

Interdyscyplinarne podstawy współczesnej wiedzy o zmianie klimatu

KLIMA TYCZNE ABC

REDAKCJA NAUKOWA

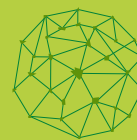
Magdalena Budziszewska

Aleksandra Kardaś

Zbigniew Bohdanowicz



UNIwersytet
Warszawski



KLIMATYCZNE ABC

Materiały edukacyjne podzielone
na lekcje klimatyczne znajdziesz
na stronie:

www.klimatyczneABC.uw.edu.pl »



UNIwersYTET
WARSZAWSKI

www.uw.edu.pl »

Więcej informacji o zespole
„Uniwersytet Warszawski
dla klimatu” znajdziesz na stronie:

www.uwdlaklimatu »

REDAKCJA NAUKOWA

Magdalena Budziszewska
Aleksandra Kardaś
Zbigniew Bohdanowicz

AUTORZY

Zbigniew Bohdanowicz, dr Magdalena Budziszewska,
dr inż. Paweł Gajda, dr hab. Marek Giergiczny, dr Jakub Jędrak,
dr Aleksandra Kardaś, dr hab. Wiktor Kotowski, prof. UW,
dr hab. Beata Łopaciuk-Gonarczyk, prof. dr hab. Szymon Malinowski,
dr hab. Andrzej Mikulski, dr Barbara Pietrzak, mgr inż. Adam Rajewski,
dr Aleksandra Świdorska, dr Adrian Wójcik, dr Jan Witajewski-Baltvilks,
prof. dr hab. Tomasz Żylicz

WSPÓŁPRACA

Katarzyna Łukaszewska
Małgorzata Podstawa
Justyna Szczepanik

RECENZENCI

prof. dr hab. Zbigniew W. Kundzewicz,
członek korespondent PAN, członek Academia Europaea
dr Krzysztof Niedziałkowski,
Instytut Filozofii i Socjologii Polskiej Akademii Nauk

PROJEKT GRAFICZNY, SKŁAD, OPRACOWANIE ILUSTRACJI

Anna Zagrajek

PROJEKT OKŁADKI

Anna Zagrajek

KOREKTA

Michał Trusewicz

Niniejsza publikacja jest chroniona licencją
Creative Commons CC-BY-SA 4.0.

WYDAWCA

Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Prosta 69, 00-838 Warszawa
e-mail: wuw@uw.edu.pl
ISBN 978-83-235-4730-3 (pdf online)
Wydanie 1, Warszawa 2021

Pełen tekst licencji jest dostępny pod adresem:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>

Skrócone podsumowanie najważniejszych elementów licencji można znaleźć
pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pl>

www.zagrajkania.myportfolio.com »

Ilustracja na okładce pokazuje zmia-
ny globalnej średniej temperatury po-
wierzchni Ziemi w latach 1850–2019.
Każdy pasek oznacza jeden rok,
paski niebieskie to lata ze średnią
temperaturą poniżej a czerwone –
powyżej średniej z lat 1971–2000.
Kolor granatowy symbolizuje lata
najchłodniejsze a ciemnoczerwony
lub brązowy – najcieplejsze.
Czytamy od lewej do prawej.

Źródło: Ed Hawkins (University of Reading):
<https://showyourstripes.info> (licencja CC BY 4.0)

Księgarnia internetowa WUW:

www.wuw.pl »



PODZIĘKOWANIE

Serdecznie dziękujemy za pomoc organizacyjną i redakcyjną oraz inspirację pani Katarzynie Łukaszewskiej, pani Małgorzacie Podstawie i pani Justynie Szczepanik, które wspierały powstawanie tej książki. Bez tej niewidocznej pomocy, nasza praca byłaby o wiele trudniejsza.

Serdecznie dziękujemy prof. Karolinie Safarzyńskiej z Wydziału Nauk Ekonomicznych za pomoc merytoryczną i konsultację materiałów.

Udział w konsultowaniu i tworzeniu niniejszego projektu oraz poszczególnych pomysłów, które się na niego składają, mieli także pracownicy Wydziału Biologii UW: mgr Joanna Lilpop z Pracowni Dydaktyki Biologii, mgr Annna Albin z Ogrodu Botanicznego oraz prof. Joanna Pijanowska, prof. Jacek Pniewski z Wydziału Fizyki UW oraz mgr Anna Sierpińska, redaktorka portalu Naukaoklimacie.pl.

Dr Magdalena Budziszewska dziękuje społeczności Wydziału Psychologii UW za odczuwalne i praktyczne wsparcie, które także umożliwiło powstanie tego projektu.

Z RECENZJI

„Podręcznik *„Klimatyczne ABC”* stanowi pracę zbiorową (...) uznanych badaczy i ekspertów z zakresu fizyki, chemii, biologii, ekologii, ekonomii, psychologii oraz inżynierii, którzy w kompleksowy sposób opisali podstawowe zagadnienia dotyczące globalnych zmian klimatycznych.”

„Szeroki zakres tematyczny pozwala czytelnikowi na zdobycie podstawowych informacji dotyczących zmian klimatycznych z kilku dziedzin nauki oraz na stworzenie sobie całościowego obrazu wyzwań społecznych związanych z globalnym ociepleniem. Autorzy opierali się przy tym w dużej mierze na wynikach niedawno publikowanych badań, dzięki czemu podręcznik jest zgodny z aktualnym stanem wiedzy. Jest on przy tym napisany w sposób przystępny, tj. może być zrozumiany zarówno przez studentów kierunków ścisłych, jak i humanistycznych. Jest to szczególnie ważne przy opisie fizycznych zjawisk leżących u podstaw globalnego ocieplenia. Autorom udało się w sposób zrozumiały przedstawić podstawowe pojęcia i zagadnienia w tym zakresie.”

Z recenzji dr Krzysztofa Niedziałkowskiego

„Moim zdaniem, materiały podlegające recenzji są zgodne z aktualnym stanem wiedzy i bardzo przydatne do celów edukacji klimatycznej. (Odpowiadają ...) zasadniczym potrzebom studentów wyższych uczelni, uczniów wyższych klas szkół średnich, a także nauczycieli akademickich i licealnych. Właściwie, zainteresowany może być także każdy pracownik naukowy z dowolnej dziedziny i na dowolnym szczeblu hierarchii, od asystenta, czy doktoranta do profesora. Gwarantuję, że każdy, nawet wysokiej klasy ekspert w jakiejś dziedzinie związanej ze zmianą klimatu, znajdzie (tu) coś nowego i wartościowego. Zdecydowanie stwierdzam, że zbiór osób, które znają wszystkie elementy omawiane w materiale *„Klimatyczne ABC”*, jest zbiorem pustym. Kurs pozwala nauczyć się ciekawych rzeczy spoza swojej domeny. Materiał może zainteresować również światłe osoby pracujące nad sobą w formie kształcenia ustawicznego, np. absolwentów uczelni sprzed wielu lat.”

Z recenzji prof. Zbigniewa W. Kundzewicza

SPIS TREŚCI

WSTĘP 6

LEKCJA 1

OD CZEGO ZALEŻY TEMPERATURA ZIEMI? 20

Jak działa efekt cieplarniany? 21

Co się dzieje, gdy zaburzymy
bilans energetyczny atmosfery? 24

Wymuszenia i sprzężenia
w systemie klimatycznym Ziemi 28

Punkty krytyczne
w systemie klimatycznym Ziemi 32

LEKCJA 2

JAK WĘGIEL KRAŻY W PRZYRODZIE? 36

Węgiel na Ziemi 37

Wolny cykl węglowy
i termostat węglowy 40

Węgiel w oceanach 45

Węgiel w ekosystemach lądowych 49

Impuls węglowy i jego usuwanie
z atmosfery 53

LEKCJA 3

SKĄD SIĘ BIORĄ ANTROPOGENICZNE EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH? 56

Antropogeniczne emisje dwutlenku
węgla 57

Antropogeniczne emisje innych
gazów cieplarnianych 62

Emisje gazów cieplarnianych
z różnych sektorów gospodarki 67

Emisje gazów cieplarnianych
a klimat 72

LEKCJA 4

DLACZEGO EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH WCIAŻ ROSNĄ? 74

Klimat jako dobro publiczne 75

Tożsamość Kai – źródła
wzrostu emisji 80

LEKCJA 5

FAKTY I MITY O ZMIANIE KLIMATU 85

Skąd wiemy, że to wzrost koncentracji
gazów cieplarnianych doprowadził
do ocieplenia klimatu? 86

Skąd wiemy, że to działalność
człowieka doprowadziła do wzrostu
koncentracji gazów cieplarnianych
w atmosferze? 91

Mity klimatyczne 95

LEKCJA 6

CO POWSTRZYMUJE NAS PRZED PRZECIWDZIAŁANIEM ZMIANIE KLIMATU? 98

Zaprzeczanie zmianom klimatu.
Jak to wyjaśnić? 99

Postawy wobec zmiany klimatu
w Polsce 104

Jakie są bariery dla zachowań
prośrodowiskowych? 109

LEKCJA 7

WPLYW ROZWOJU GOSPODARKI PRZEMYSŁOWEJ NA STAN KLIMATU I PRZYRODY 117

Jak do kryzysu klimatycznego
i ekologicznego podchodzi
ekonomia? 118

Protokół montrealowski jako przykład
skutecznego międzynarodowego
porozumienia ekologicznego 135

LEKCJA 8

JAK ZMIANA KLIMATU WPLYWA NA PRZYRODĘ NIEOŻYWIONĄ? 142

Zmiana klimatu to zmiana
statystyk 143

Scenariusze na przyszłość 147

Zmiany w pogodzie 149

Zmiany w oceanie i kriosferze 159

LEKCJA 9

JAK ZMIANA KLIMATU WPLYWA NA PRZYRODĘ OŻYWIONĄ? 167

Dostępność wody 168

Wpływ zmian klimatu na osobniki,
populacje, gatunki 179

Różnorodność biologiczna
a funkcjonowanie
ekosystemów 171

Wpływ człowieka na różnorodność
biologiczną 176

Efekty bezpośrednie i sprzężenia
zwrotne 182

LEKCJA 10

POŁĄCZENIA. JAK ZMIANY W BIOSFERZE WPLYWAJĄ NA KLIMAT? 185

Klimatyczne sprzężenia zwrotne
– czy mamy na nie wpływ? 186

W jaki sposób ekosystemy
magazynują węgiel? 194

Klimat a ekosystemy lądowe 196

Nie tylko zmiana klimatu. Granice
planetarne, czyli jaka jest odporność
biosfery na działania człowieka? 204

LEKCJA 11

SPOŁECZNE I PSYCHOLOGICZNE KONSEKWENCJE ZMIANY KLIMATU 210

Wpływ zmiany klimatu na
nierówności i migracje
na świecie 211

Konsekwencje psychologiczne
zmiany klimatu 216

Co ludzie czują wobec zmiany
klimatu? 220

Strategie radzenia sobie
ze stresem 226

LEKCJA 12

JAK PRZECIWDZIAŁAĆ KRYZYSOWI KLIMATYCZNEMU? 229

Najważniejsze wnioski z raportu
IPCC o ociepleniu o 1,5°C 230

Transformacja sektora
energetycznego 236

Smog a zmiana klimatu 255

LEKCJA 13

DZIAŁANIA OGRANICZAJĄCE ZMIANĘ KLIMATU 260

Mitygacja i adaptacja do zmiany
klimatu – rozwiązania ekonomiczne
262

Mitygacja i adaptacja do zmiany
klimatu – gospodarowanie
ekosystemami 273

Co mogą zrobić dla klimatu? 283

25 PYTAŃ I ODPOWIEDZI

NA TEMAT ZMIANY KLIMATU 291

BIBLIOGRAFIA 296



W obliczu kryzysu klimatycznego zgodna ze współczesnym stanem wiedzy naukowej edukacja na jego temat jest wyjątkowo pilną potrzebą. Dlatego z inicjatywy naukowców pracujących na Uniwersytecie Warszawskim i związanych z zespołem **UW dla Klimatu** powstał niniejszy podręcznik. Współtworzą go także badacze z innych ośrodków akademickich. Wspólne kompendium podstawowych zagadnień stworzyło 16 ekspertów reprezentujących różne dziedziny wiedzy takie, jak fizyka, chemia, biologia, ekologia, ekonomia, psychologia oraz inżynieria. Jest to zatem podręcznik interdyscyplinarny, tak jak samo zagadnienie zmiany klimatu. Wszyscy autorzy niniejszego podręcznika są naukowcami. Wszyscy są też pracownikami polskich uczelni i ośrodków badawczych, Uniwersytetu Warszawskiego, ale także Politechniki Warszawskiej, Polskiej Akademii Nauk, Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu i Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Adresatami podręcznika są studenci uczelni, zainteresowani podstawami wiedzy o zmianie klimatu, niezależnie od kierunku studiów oraz starsi uczniowie i nauczyciele. Poszczególne tematy „Klimatycznego ABC” łączą się z takimi obszarami wiedzy szkolnej jak: fizyka, chemia, biologia z ekologią, geografia i wiedza o społeczeństwie.

Podręcznik „Klimatyczne ABC” towarzyszy też kursowi internetowemu pod tą samą nazwą oferowanemu przez Uniwersytet Warszawski.

Podręcznik podzielony jest na 4 części, przedstawiające mechanizmy (cz. 1) i przyczyny globalnego ocieplenia (cz. 2), jego konsekwencje (cz. 3) oraz działania, które mogą zapobiec najbardziej negatywnym skutkom zmiany klimatu (cz. 4).

INTERDYSCYPLINARNOŚĆ PROBLEMU ZMIANY KLIMATU

Zmiana klimatu jest bez wątpienia jednym z poważniejszych, jeśli nie najważniejszym, wyzwaniem cywilizacyjnym, z jakim ludzkość mierzy się na początku XXI wieku (IPCC, 2018).

Jeśli chcemy, aby nasza diagnoza problemu była prawidłowa, a zaproponowane rozwiązania skuteczne, musimy bazować na wiedzy naukowej. W debacie publicznej, w tym w mediach, a także w rozmowach prywatnych, możemy spotkać się z wieloma nieprawdziwymi informacjami na temat zmiany klimatu, błędnymi koncepcjami, nieporozumieniami oraz dezinformacją.

Dlatego pierwszym krokiem dla wszystkich ludzi powinna być próba zrozumienia mechanizmów zachodzących zjawisk, ich skali i wzajemnych zależności. Wiedzę na ten temat dobrze jest czerpać ze sprawdzonych źródeł. Dzięki temu można wyrobić sobie własne zdanie w wielu obszarach związanych ze zmianą klimatu oraz samodzielnie oceniać proponowane rozwiązania.

W najbliższych latach coraz wyraźniej będzie widać, jak poważnym problemem jest zmiana klimatu. Podstawy wiedzy na ten temat będą niezbędne do poruszania się we współczesnym świecie i jego zrozumienia. Tym bardziej warto poświęcić czas, aby je zdobyć. Właśnie temu ma służyć niniejszy podręcznik.

KLIMAT I JEGO ZMIANA

Wielu osobom temat zmiany klimatu kojarzy się głównie z zagrożeniem. To skojarzenie jest słuszne, bo problemy wynikające ze zmiany klimatu są zarówno prawdziwe, jak i bardzo poważne. Istnieje w tej sprawie konsensus naukowy (Pachauri i in., 2014, IPCC, 2018).

Natomiast patrząc na klimat i jego zmianę jak na przedmiot badań naukowych, można stwierdzić, że jest to również bardzo ciekawy obszar wiedzy.

W systemie klimatycznym Ziemi zachodzi wiele różnych zjawisk, obejmujących:

- **materię nieożywioną – atmosferę, oceany, skały** i toczące się w nich reakcje chemiczne czy przemiany fizyczne (np. tworzenie się chmur lub lodu) albo przepływy materii (np. parowanie wody). Są to między nimi zjawiska globalne rozgrywające się na przestrzeni **tysięcy lub milionów lat** (np. powolne wietrzenie skał, które usuwa z atmosfery dwutlenek węgla) oraz lokalne fenomeny zachodzące w ciągu **pojedynczych sekund czy godzin** (np. tworzenie się chmury bądź porywanie pyłów przez wiatr);
- **żywe organizmy i całe tworzone z ich udziałem ekosystemy** – od najdrobniejszych bakterii po ogromne obszary leśne, torfowiska czy rafy koralowe. Również one uczestniczą w procesach o różnych skalach czasowych, od **skali geologicznej**, w której ze szczątków roślin powstały paliwa kopalne, po **coroczne fluktuacje** wegetacji w rytmie pór roku.

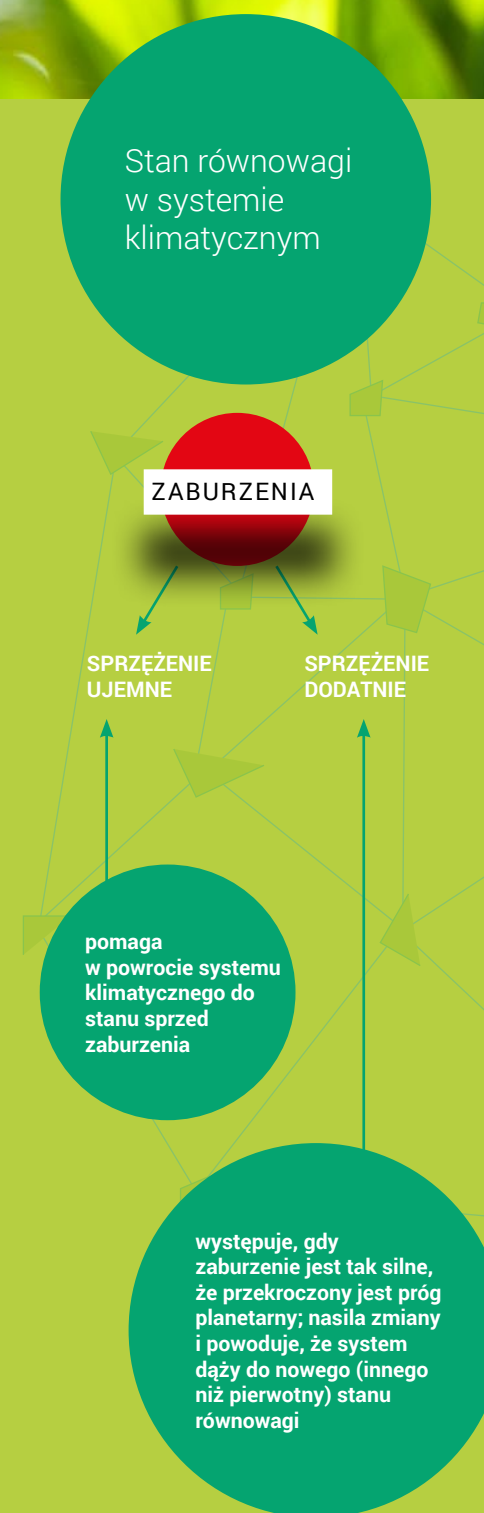
Klimat Ziemi jest złożonym, fascynującym systemem, w którym niemal wszystko jest ze sobą powiązane. Powiązania te uwidaczniają się wtedy, gdy spojrzymy na niego całościowo i na przestrzeni tysięcy lub milionów lat.

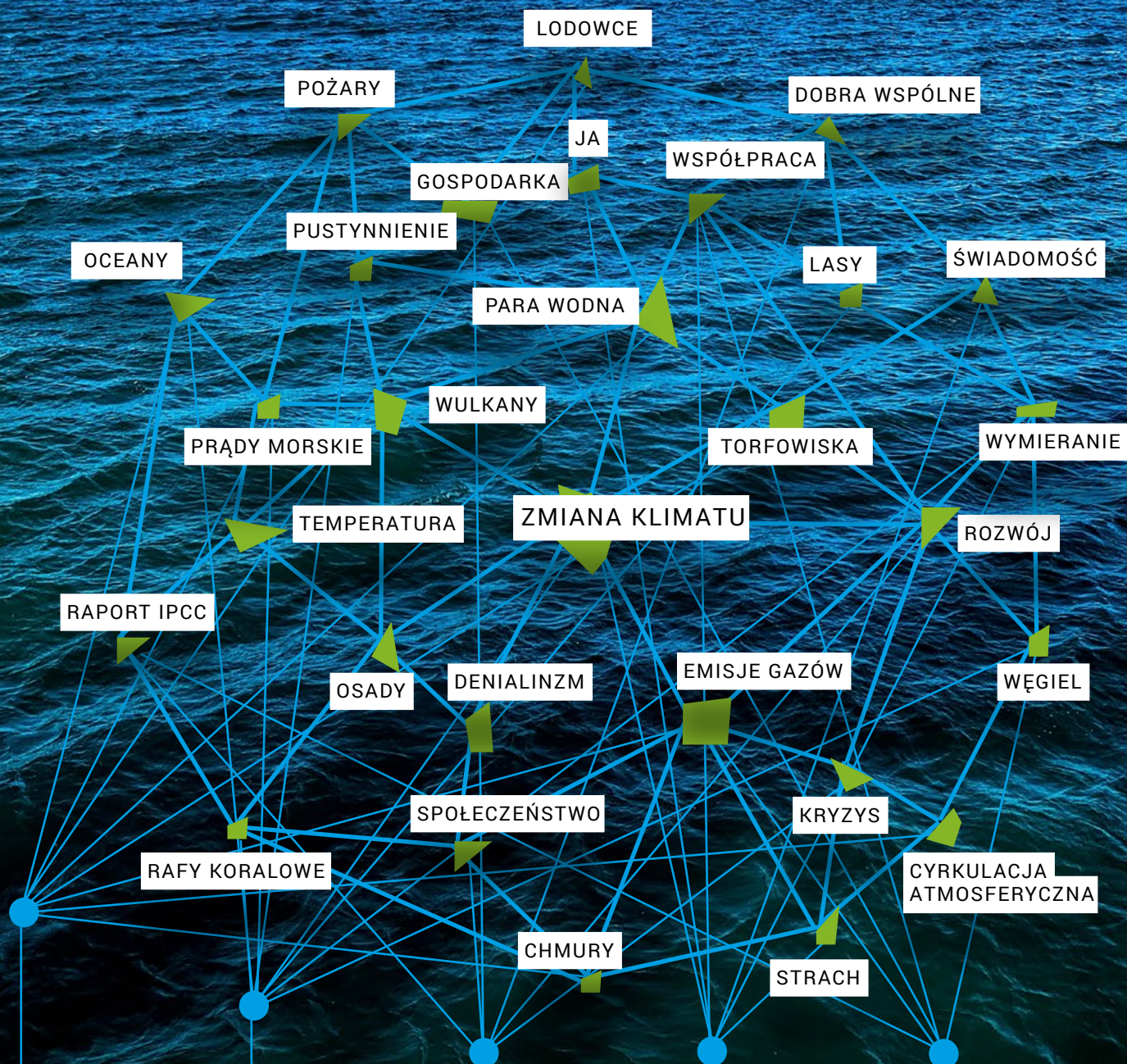
System ten dąży do osiągnięcia **stanu równowagi**, w którym ilość energii uciekającej z Ziemi w kosmos jest równa ilości docierającej do niej ze Słońca, a ilość wody parującej z powierzchni Ziemi jest równa ilości spadającej w tym samym czasie w postaci deszczu czy śniegu.

Każde **zaburzenie** powoduje w nim całą lawinę zjawisk, które mogą pomóc mu w powrocie do stanu sprzed zaburzenia, ale też nasilić zmianę. W skrajnym przypadku może dojść do zmiany stanu równowagi, do którego system będzie dążył. Brak naszej ingerencji przestanie wtedy wystarczać do zatrzymania zmian.

Poznanie wzajemnych powiązań elementów systemu klimatycznego pozwala zrozumieć, czemu zapoczątkowana przez człowieka zmiana klimatu jest i może być w przyszłości poważnym wyzwaniem dla ludzkości, z czysto fizycznych powodów.

Problem ludzkiej interwencji w system klimatyczny nie jest jednak kwestią czysto fizyczną czy – szerzej – przyrodniczą. To także zagadnienie z dziedziny ekonomii, funkcjonowania społeczeństw i tego, jak radzą sobie one (lub nie) z własnym rozwojem, egzystencjalnym zagrożeniem i konieczną zmianą.





FI ZY KA

Aleksandra
Kardaś

Jakub
Jędrak

Szymon
Malinowski

BIO LO GIA

Wiktor
Kotowski

Andrzej
Mikulski

Barbara
Pietrzak

E KO NO MIA

Zbigniew
Bohdanowicz

Tomasz
Żylicz

Jan
Witajewski-Baltvilks

Beata
Łopaciuk-Gonarczyk

Marek
Giergiczny

PSY CHO LO GIA

Magdalena
Budziszewska

Aleksandra
Świderska

Adrian
Wójcik

ENER GE TY KA

Paweł
Gajda

Adam
Rajewski

STRUKTURA PODRĘCZNIKA:

Część pierwsza podręcznika – **PODSTAWOWE MECHANIZMY** – obejmuje zrozumienie podstawowych procesów rządzących klimatem i jego zmianą.

- **Pierwszą lekcję** stanowi niniejsze wprowadzenie, jego celem jest pokazanie powiązań i interdyscyplinarności problemu zmiany klimatu.
- Na czym polegają przepływy energii w systemie klimatycznym i jak działa bilans energetyczny atmosfery? Co się dzieje, jeśli go zaburzymy? Czym są funkcjonujące w systemie klimatycznym sprzężenia zwrotne i punkty krytyczne? Tego wszystkiego można dowiedzieć się z **lekcji nr 2 – Od czego zależy temperatura Ziemi?**
- Lekcja 3 opisuje przepływ węgla (pierwiastka) pomiędzy poszczególnymi elementami systemu klimatycznego. Przepływy te regulują, podgrzewają lub schładzają klimat. Tutaj można dowiedzieć się też, dlaczego w tych procesach kluczowy jest ocean. **Lekcja nr 3 – Jak węgiel krąży w przyrodzie?**

Część druga podręcznika – **PRZYCZYNY** – pomoże zrozumieć, co doprowadziło do obecnej sytuacji. Odpowiada na pytania, skąd biorą się modyfikujące klimat emisje gazów cieplarnianych i czemu ludzkość już od kilku dziesięcioleci nie jest w stanie skutecznie przeciwdziałać zmianie klimatu, pomimo dostępnej wiedzy na ten temat.

- Jakie procesy techniczne, rolnicze i inne prowadzone przez człowieka powodują emisje poszczególnych gazów cieplarnianych? Które sektory gospodarki za nie odpowiadają? Wspomniane zagadnienia omawiamy w **lekcji nr 4. – Skąd biorą się antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych?**
- Jak reagują i gospodarują ludzie, jeśli pewne zasoby są wspólne i darmowe? Jak rozwój gospodarki, populacji i poprawa poziomu życia łączą się z emisjami gazów cieplarnianych? **Odpowiedzi na te pytania znajdują się w lekcji nr 5 – Dlaczego emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną?**
- **W lekcji nr 6 – Fakty i mity o zmianie klimatu** – przedstawimy dowody naukowe na to, że współczesna zmiana klimatu jest spowodowana działalnością człowieka. Przyjrzymy się też najpopularniejszym mitom na temat zmiany klimatu.
- **Tematem lekcji nr 7 – Co powstrzymuje nas od przeciwdziałania zmianie klimatu?** – są postawy społeczne wobec globalnego ocieplenia. To tu zajmiemy się przeszkodami psychologicznymi, z powodu których ludziom jest tak trudno adekwatnie zareagować na zmianę klimatu. Opowiemy także, czym jest negacjonizm klimatyczny i skąd się on bierze.

LEKCJA 2

LEKCJA 3

LEKCJA 4

LEKCJA 5

LEKCJA 6

LEKCJA 7

FI
ZY
KASO
CJO
LO
GIABIO
LO
GIAPSY
CHO
LO
GIA

- Jak różne mainstreamowe i alternatywne teorie ekonomiczne wyjaśniają procesy, które doprowadziły do aktualnego kryzysu klimatycznego i ekonomicznego? Odpowiedź na to pytanie znajduje się w **lekcji nr 8 – Wpływ rozwoju gospodarki przemysłowej na stan klimatu i przyrody**.

W części trzeciej podręcznika – **KONSEKWENCJE** – opowiemy o tym, jak daleko zaszła zmiana klimatu, jakie są przewidywane scenariusze jej dalszego postępowania i jakie będą tego konsekwencje.

- Jak w praktyce przejawia się globalne ocieplenie? Jakie zmiany występują (i mogą wystąpić w przyszłości) w elementach przyrody nieożywionej? **W lekcji nr 9 – Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę nieożywioną?** – wytłumaczymy, jak wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi przekłada się na zmiany statystyk pogodowych, poziomu morza czy masy lodowców i lądolodów.
- Jakie skutki ma zmiana klimatu dla ekosystemów, gatunków i bioróżnorodności? O tym opowiemy w **lekcji nr 10 – Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę ożywioną?**
- **Lekcja nr 11 – Połączenia. Jak zmiany w biosferze wpływają na klimat?** – pokazuje zmianę klimatu w kontekście innych problemów ekologicznych. Wprowadza ona pojęcie granic planetarnych, a także pokazuje, jak poszczególne systemy umożliwiające życie na Ziemi są ze sobą powiązane.
- **W lekcji nr 12 – Społeczne i psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu** – najpierw omawiamy skutki zmiany klimatu z perspektywy społecznej. Są one poważne. Są to migracje, zwiększanie się skrajnych nierówności społecznych oraz wyższe ryzyko wystąpienia konfliktów zbrojnych. Druga część tej lekcji dotyczy psychologii, a w szczególności konsekwencji zmiany klimatu dla emocji, stresu i zdrowia psychicznego. Lęk i depresja powiązane ze świadomością zmian klimatycznych stają się już problemem, o którym mówią ludzie na całym świecie. Lekcja 12 dostarcza także uniwersalnych wskazówek dotyczących radzenia sobie w przewlekłych sytuacjach stresowych.

LEKCJA 8

LEKCJA 9

LEKCJA 10

LEKCJA 11

LEKCJA 12

O ROZWIĄZANIACH.

- Jakie działania pozwoliłyby na zatrzymanie wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi na stosunkowo bezpiecznym poziomie (ocieplenie poniżej 1,5°C względem czasów przedprzemysłowych)? **W lekcji nr 13 – Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu? – część pierwsza** – przedstawimy najważniejsze takie posunięcia, zgodnie z podsumowaniem przedstawionym w Specjalnym raporcie Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu (IPCC, 2018). Dalsza część lekcji omawia zagadnienia związane z energetyką, kluczowym sektorem gospodarki związanym ze zmianą klimatu. Wreszcie w zakończeniu tej lekcji przyglądamy się powiązaniom zmiany klimatu z problemem jakości powietrza (smogu). Są to dwa często mylone ze sobą zagadnienia, a jednocześnie problem smogu jest wyjątkowo ważny i widoczny z polskiej perspektywy. Niestety nie wszystkie rozwiązania redukujące smog pomagają też ograniczać zmianę klimatu.
- **W lekcji nr 14 – Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu? – część druga** – pokazujemy różnorodne praktyki ograniczania emisji i usuwania dwutlenku węgla z atmosfery, oparte na przywracaniu równowagi zniszczonym ekosystemom i związane z rolnictwem. Praktyki związane z biosferą, takie jak odtwarzanie bagiennych stref buforowych przy rzekach czy restytucja ekosystemów, mogą pomóc ograniczać zmianę klimatu, ale same w sobie nie wystarczą do jej zatrzymania na wystarczającym poziomie. W lekcji nr 14 pokazujemy także, jak różne rozwiązania i instrumenty ekonomiczne mogą pomóc w redukcji emisji gazów cieplarnianych. Wreszcie przechodzimy do poziomu jednostki i pokazujemy paradoksy i zasady, jakie rządzą indywidualnym i zbiorowym działaniem na rzecz klimatu. Zwracamy uwagę na opisywane w naukach społecznych dylematy, jakie wiążą się z dążeniem do zmiany społecznej.

Na zakończenie dodaliśmy do podręcznika skrótowy materiał – 25 pytań i odpowiedzi na temat zmiany klimatu. Odpowiadamy tam na najważniejsze pytania i wyjaśniamy jeszcze raz najczęstsze mity.

Gdyby ludzkość przystąpiła do przeciwdziałania zmianie klimatu wcześniej, jej zahamowanie byłoby dużo prostsze. Także teraz, im szybciej i bardziej zdecydowanie zareagujemy, tym szanse na ograniczenie problemu będą większe.

LEKCJA 13

ENER
GE
TY
KA

LEKCJA 14

SO
CJO
LO
GIA

BIO
LO
GIA

PSY
CHO
LO
GIA

Wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze skutkuje wzrostem średniej temperatury powierzchni Ziemi i jest potocznie nazywany „**globalnym ociepleniem**”. W tym kursie często posługujemy się jednak pojęciem **zmiana klimatu** jako bardziej precyzyjnym. Zwróć uwagę, że kiedy mówimy o zmianie klimatu w liczbie pojedynczej, mamy na myśli obecną, **antropogeniczną zmianę klimatu**, która zachodzi na naszych oczach. Zmiany klimatu zachodziły także w przeszłości, w geologicznej historii Ziemi, choć wtedy działało się to z innych przyczyn i w innych skalach czasowych.

Współcześnie, zwłaszcza w mediach, często używa się także określenia „**kryzys klimatyczny**”, a nawet „**katastrofa klimatyczna**”. Powstały one na fali krytyki wcześniej używanego terminu „globalne ocieplenie”, który kojarzy się wielu osobom (na podstawie samej nazwy) z czymś raczej nieszkodliwym i przyjemnym, nie oddaje sensu tego zjawiska i może być mylący.

Przez najbliższy tydzień postaraj się zwrócić uwagę na to, jak temat zmiany klimatu jest poruszany w mediach, jak rozmawiają o nim Twój bliscy i znajomi. Na co zwraca się uwagę, jak to zjawisko jest postrzegane i dlaczego?

Zastanów się też, co Ty sądzisz o tym zjawisku? Co już wiesz, a co budzi Twoje wątpliwości? Czego chciałbyś się dowiedzieć z tego kursu? Pomyśl przez najbliższy tydzień o temacie zmiany klimatu i potraktuj to jako przygotowanie do kolejnych lekcji.

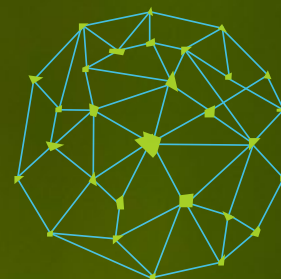


TERMINOLOGIA



ZADANIE

NAUKOWCY TWORZĄCY KLIMATYCZNE ABC



Zbigniew Bohdanowicz – ekonomista, psycholog, pracuje w Laboratorium Interaktywnych Technologii w OPI PIB. Doktorant Wydziału Nauk Ekonomicznych UW, na którym prowadzi projekt badawczy, opisujący czynniki kształtujące poparcie dla polityk przeciwdziałających zmianom klimatycznym.



dr Magdalena Budziszewska – psycholożka, pracowniczka Wydziału Psychologii UW. Naukowo zajmuje się analizą narracji, metodami jakościowymi w psychologii, emocjami, tożsamością i rozwojem w biegu życia. Prowadzi badania nad stresem, lękiem i depresją klimatyczną oraz psychologią działania na rzecz ochrony klimatu i środowiska naturalnego. Miłośniczka gór i wszystkiego dzikiego.



dr inż. Paweł Gajda – inżynier energetyk, pracownik Wydziału Energetyki i Paliw AGH w Krakowie. Naukowo zajmuje się głównie energetyką jądrową: technologiami reaktorów nowej generacji oraz zaawansowanymi cyklami paliwowymi. Popularyzator wiedzy na temat energetyki oraz wyzwań związanych z transformacją energetyczną. Członek zarządu fundacji Instytut Zrównoważonej Energetyki oraz zgromadzenia ogólnego European Nuclear Society.

EKO NO MIA

PSY CHO LO GIA

ENER GE TY KA



dr hab. Marek Giergiczny – adiunkt na Wydziale Nauk Ekonomicznych UW i pracownik Warszawskiego Ośrodka Ekonomii Ekologicznej. Absolwent Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska w 2006 roku. Zajmuje się ekonomią środowiska, wyceną dóbr nierynkowych oraz ekonomicznymi podstawami ochrony przyrody.



dr Jakub Jędrak – fizyk, pracownik Instytutu Chemii Fizycznej PAN. Obecnie zajmuje się tworzeniem i analizą matematycznych modeli ekspresji genów w populacjach organizmów jednokomórkowych. Należy do Polskiego Alarmu Smogowego (Krakowski Alarm Smogowy i Warszawa Bez Smogu), w których skupia się na popularyzacji wiedzy o wpływie zanieczyszczeń powietrza na zdrowie ludzkie. Od czasu do czasu pisze artykuły poświęcone ochronie środowiska, w szczególności zmianie klimatu i jej konsekwencjom, które ukazują się głównie na portalu smoglab.pl, a okazjonalnie także na stronie naukaoklimacie.pl.



dr Aleksandra Kardaś – fizyczka atmosfery, redaktorka serwisu „Nauka o klimacie” i współautorka książki pod tym samym tytułem. Pracuje na Wydziale Fizyki UW. Zawodowo zajmuje się popularyzacją wiedzy na temat pogody i klimatu. Interesuje ją rozprzestrzenianie się informacji i dezinformacji.

EKO NO MIA

FI ZY KA

FI ZY KA



dr hab. Wiktor Kotowski, prof. UW – biolog-ekolog zajmujący się funkcjonowaniem ekosystemów oraz naukowymi podstawami ochrony przyrody – zwłaszcza w kontekście ograniczania zmiany klimatu i adaptacji do niej. Pracuje na Wydziale Biologii UW. Głównym przedmiotem jego badań są ekosystemy bagienne, angażuje się też społecznie i zawodowo w ich ochronę m.in. poprzez działalność w organizacjach pozarządowych oraz w Radzie Naukowej Biebrzańskiego Parku Narodowego.

Jest przekonany, że uniknięcie katastrofalnych dla człowieka i biosfery zmian środowiska wymaga radykalnych zmian w relacji człowieka z przyrodą oraz systemowej transformacji społecznej i politycznej, dlatego aktywnie wspiera działalność ruchów aktywistycznych domagających się takich zmian.



dr hab. Beata Łopaciuk-Gonarczyk – ekonomistka, pracuje na Wydziale Nauk Ekonomicznych UW. Zajmuje się analizą sieci społecznych i badaniem kapitału społecznego m.in. w kontekście zrównoważonego rozwoju. Jest autorką artykułów opublikowanych w międzynarodowych czasopismach naukowych, w tym na łamach „Ecological Economics”. Interesuje się wpływem sieci społecznych na kształtowanie się postaw proekologicznych.



prof. dr hab. Szymon Malinowski – fizyk atmosfery, specjalista od fizyki chmur i opadów, turbulencji, modelowania numerycznego procesów atmosferycznych, pomiarów i analizy danych, uczestnik wielu międzynarodowych i krajowych kampanii badawczych, popularyzator nauki. Pracuje na Wydziale Fizyki UW. Współautor książki „Nauka o klimacie”.

BIO LO GIA

EKO NO MIA

FI ZY KA



dr hab. Andrzej Mikulski – biolog, ekolog, hydrobiolog, pracownik Wydziału Biologii UW. Naukowo zajmuje się wpływem czynników biotycznych i abiotycznych na organizmy i konsekwencjami tego wpływu na funkcjonowanie systemów biologicznych. W praktyce zajmuje się też ochroną i rekultywacją jezior oraz ochroną rzek. Lubi góry, lodowce i podróże.



dr Barbara Pietrzak – ekolożka, pracowniczka Wydziału Biologii UW. Naukowo zajmuje się plastycznością behawioru i historii życia zwierząt wobec wyzwań środowiskowych. Prowadzi badania nad kształtowaniem się indywidualności behawioralnej zwierząt oraz zajęcia dotyczące współczesnych zmian środowiska i związanych z nimi zagrożeń dla człowieka i biosfery. Współzałożycielka „Nauki dla Przyrody”.



mgr inż. Adam Rajewski – inżynier energetyk, absolwent i pracownik Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Naukowo zajmuje się energetyką jądrową i gazową oraz zagadnieniem wdrażania technologii niskoemisyjnych do bilansu energetycznego. Ekspert współpracujący z Departamentem Energii Jądrowej Ministerstwa Klimatu (dawniej Energii i Gospodarki) w działaniach popularyzujących wiedzę o energetyce jądrowej. Członek zespołów badających możliwości udziału polskiego przemysłu w rozwoju energetyki jądrowej. Honorowy prezes Koła Naukowego Energetyków Politechniki Warszawskiej. Poza uczelnią pracuje w międzynarodowej firmie dostarczającej urządzenia dla energetyki, gdzie zajmuje się projektowaniem układów niskoemisyjnego zasilania dla centrów danych.



dr Aleksandra Świderska – psycholożka, adiunktka naukowa na Wydziale Psychologii UW. Zajmuje się pracą badawczą w dziedzinach poznania społecznego, psychofizjologii i psychologii emocji. Interesuje ją szczególnie psychologia (braku) działania w obliczu zmian klimatycznych.

BIO LO GIA

BIO LO GIA

ENER GE TY KA

PSY CHO LO GIA



dr Adrian Wójcik – psycholog społeczny, pracownik Instytutu Psychologii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Naukowo zajmuje się psychologicznymi podstawami postaw i zachowań prośrodowiskowych. Prowadzi warsztaty z komunikacji dla organizacji proekologicznych.



dr Jan Witajewski-Baltvilks – kierownik Warszawskiego Ośrodka Ekonomii Ekologicznej na UW oraz adiunkt na Wydziale Nauk Ekonomicznych UW. Autor prowadzący Szóstego Raportu IPCC i członek doradczego komitetu redakcyjnego w czasopiśmie „Climate Policy”. Autor publikacji naukowych, w tym artykułów w międzynarodowych czasopismach Energy Economics i Environmental Innovation and Societal Transition. Absolwent London School of Economics (BSc Economics), University of Cambridge (MPhil Economics) oraz European University Institute (MRes oraz PhD). Uczestniczył w szeregu projektów mających na celu oszacowanie kosztów związanych z polityką klimatyczną.



prof. dr hab. Tomasz Żylicz – pracownik Wydziału Nauk Ekonomicznych UW od 1974 r. W 1978–1979 w Madison, USA. W 1988–1989 praca w Instytucie Nauk Behawioralnych na Uniwersytecie Colorado w Boulder, USA. W 1992–1993 praca w Szwedzkiej Królewskiej Akademii Nauk w Sztokholmie. W latach 1989–1991, korzystając z urlopu na UW, pracował w Ministerstwie Ochrony Środowiska. Opublikował liczne artykuły i książki, głównie z zakresu ekonomii ekologicznej.

PSYCHOLOGIA

EKONOMIA

EKONOMIA



KLIMATYCZNE ABC

Od czego zależy temperatura Ziemi?

By zrozumieć, w jaki sposób ludzkości udało się wpłynąć na klimat całej planety, oraz móc ocenić konsekwencje zachodzącego obecnie globalnego ocieplenia, musisz poznać kilka podstawowych pojęć.

Tę lekcję zaczniemy od wytłumaczenia, czym jest bilans energetyczny Ziemi. Wyjaśnimy też, na czym polega efekt cieplarniany, zjawisko, dzięki któremu powierzchnię naszej planety pokrywają oceany i pełne życia ekosystemy lądowe, a nie warstwa lodu.

Następnie dowiesz się, co może doprowadzić do zaburzenia bilansu energetycznego Ziemi i w efekcie globalnej zmiany klimatu. Procesy te mogą mieć charakter wymuszeń (jak działalność człowieka polegająca na emisji gazów cieplarnianych) lub sprzężeń (jak zmiany w pokrywie lodowej w efekcie wcześniejszego ocieplenia albo ochłodzenia). Rozróżnienie na wymuszenia i sprzężenia przyda się nam w kolejnych lekcjach, w których opisywać będziemy różne efekty, które są jednocześnie skutkiem zmiany klimatu i mogą prowadzić do jej nasilania.

Mysłąc o postępującym obecnie ocieplaniu się klimatu, mamy tendencję do zakładania, że związek pomiędzy wzrostem temperatury a innymi zjawiskami (np. topnieniem lądolodów albo wzrostem poziomu morza) jest liniowy, czyli że:

- każde dodatkowe pół stopnia ocieplenia będzie oznaczało po prostu trochę poważniejsze skutki,
- jeśli uda nam się zatrzymać lub cofnąć ocieplenie, to cofną się także inne zmiany.

To jednak nieprawda. Wiele procesów ma swój punkt krytyczny – po jego przekroczeniu przyspieszają lub są nie do powstrzymania. To oznacza, że jeśli ocieplenie „zajdzie za daleko”, możemy utracić możliwość zahamowania wzrostu temperatury oraz innych związanych z nim zjawisk. Temu ważnemu zagadnieniu będzie poświęcona ostatnia część tej lekcji.

Jak działa efekt cieplarniany?

Efekt cieplarniany to naturalne zjawisko kształtujące klimat Ziemi. Jest następstwem tego, że ziemiska atmosfera (a konkretniej – niektóre tworzące ją gazy, tzw. gazy cieplarniane) w różny sposób oddziałuje z promieniowaniem o różnej długości fali. Gdyby nie efekt cieplarniany, średnia temperatura powierzchni Ziemi byłaby o ponad 30 stopni niższa.

ENERGIA DLA ZIEMI

Pierwotnym źródłem energii dla wszelkich procesów zachodzących na powierzchni Ziemi czy w atmosferze jest Słońce. Słońce przekazuje naszej planecie energię w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Jest to przede wszystkim promieniowanie widzialne, czasami w skrócie nazywane krótkofalowym. Większość tego promieniowania przenika swobodnie przez atmosferę, dociera do powierzchni Ziemi i może być przez nią pochłaniana.

KLUCZOWA JEST RÓWNOWAGA

Dzięki stałym dostawom energii ze Słońca, powierzchnia Ziemi może utrzymywać swoją średnią temperaturę na mniej więcej stałym poziomie, mimo że sama również promieniuje – wysyła w przestrzeń energię w postaci fal podczerwonych (zwanych też długimi). Nie jest to żadne tajemnicze zjawisko: promieniowanie emitują wszystkie obiekty we wszechświecie. Jak silnie i w jakich długościach fali – to zależy od ich temperatury. Im cieplejsze ciało, tym silniej promieniuje (wysyła w przestrzeń więcej energii) – mówi o tym fizyczne prawo Stefana-Boltzmanna.

Ziemia dąży do tego, aby emitować w przestrzeń kosmiczną taką samą ilość energii, jaką otrzymuje od Słońca. To kwestia bilansu energii: gdy emisja jest za mała, energia gromadzi się w systemie klimatycznym, podnosząc średnią temperaturę powierzchni Ziemi aż do momentu, w którym może ona pozbywać się takiej samej ilości energii, jaką otrzymuje. Gdy emisja jest za duża, występuje deficyt energii i spadek temperatury, co zmniejsza emisję promieniowania.

Jednak na to, w jaki sposób powierzchnia Ziemi pozbywa się energii, wpływa obecność atmosfery. Oprócz tlenu, azotu i argonu znajdują się w niej także para wodna, dwutlenek węgla, metan, tlenek azotu(I) i freony. Te ostatnie nazywamy gazami cieplarnianymi lub szklarniowymi, ponieważ spełniają w atmosferze funkcję podobną do szklanego dachu szklarni: przepuszczają krótkofalowe promieniowanie słoneczne, ale pochłaniają promieniowanie



Promieniowanie elektromagnetyczne to inaczej fale elektromagnetyczne. Ze względu na różne temperatury, Słońce i Ziemia emitują fale o różnych długościach:

- > Słońce krótkofalowe ($< 4 \mu\text{m}$)
- > Ziemia długofalowe ($> 4 \mu\text{m}$)

Promieniowanie słoneczne to przede wszystkim fale widzialne ($0,4\text{--}0,7 \mu\text{m}$), a ziemskie to podczerwień.

Bilans energii

Aby policzyć bilans energii jakiegoś ciała:

- > sumujemy, ile energii otrzymuje,
- > sumujemy, ile energii oddaje,
- > liczymy różnicę tych wielkości.

Bilans zerowy oznacza, że ciało ma stałą temperaturę, dodatni – że się rozgrzewa, ujemny – że stygnie.

CZY WIESZ, ŻE ?

🔗 Tlenek azotu(I) (zwany też tlenkiem diazotu) funkcjonował kiedyś pod nazwami „podtlenek azotu” oraz „gaz rozwesalający”. Bywał wykorzystywany do znieczulania, zwłaszcza podczas zabiegów stomatologicznych.

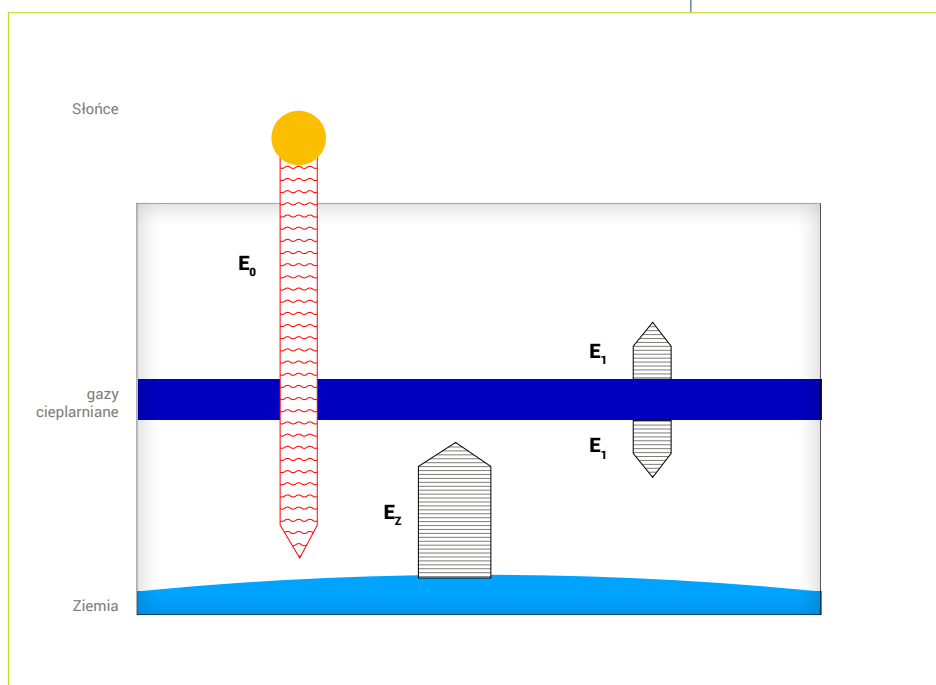
Gazy cieplarniane to gazy, które ze względu na budowę swoich cząsteczek nie pochłaniają promieniowania widzialnego, ale pochłaniają promieniowanie podczerwone.

długofalowe, podczerwone. Wskutek tego atmosfera się ogrzewa i sama również zaczyna emitować promieniowanie podczerwone. Częściowo w górę, w przestrzeń kosmiczną, a częściowo w dół, tak że dociera ono do powierzchni planety i jest przez nią pochłaniane. Dzięki temu „zwrotowi” energii, powierzchnia Ziemi ma temperaturę wyższą (o ponad 30 stopni!), niż gdyby atmosfery nie było.

Opisane wyżej zjawisko nazywamy efektem cieplarnianym.

CZY WIESZ, ŻE ?

- ☞ Większość energii zasilającej procesy zachodzące na powierzchni Ziemi pochodzi ze Słońca.
- ☞ Wszystkie ciała promieniają.
- ☞ Im cieplejsze ciało, tym więcej energii wypromiowuje.
- ☞ Długość fal promieniowania elektromagnetycznego emitowanych przez ciało zależy od jego temperatury.



Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery, w którym wszystkie gazy cieplarniane wypełniające atmosferę zastępujemy pojedynczą warstwą („szybą”). Taki model nazywamy „modelem pojedynczej szyby”.

E_0 promieniowanie słoneczne

E_z promieniowanie ziemskie

E_1 promieniowanie atmosfery a konkretnie zgromadzonych w niej gazów cieplarnianych.

Zachowanie bilansu energetycznego wymaga, aby: $E_0 = E_1$ oraz $E_z = 2E_0$.

EFEKT CIEPLARNIANY – zjawisko polegające na podwyższeniu średniej temperatury powierzchni planety w wyniku oddziaływania jej atmosfery z promieniowaniem podczerwonym emitowanym przez powierzchnię.

DEFINICJA
EFEKT CIEPLARNIANY

RZECZYWISTOŚĆ JEST TROCHĘ BARDZIEJ SKOMPLIKOWANA

Przedstawiony wyżej opis bilansu energetycznego atmosfery jest oczywiście bardzo uproszczony. Gdybyśmy chcieli przedstawić go dokładniej, musieliśmy uwzględnić rozpraszanie promieniowania słonecznego przez chmury, aerozol atmosferyczny (zawieszone w atmosferze cząstki stałe i płynne) i powierzchnię Ziemi. Zwrócilibyśmy także uwagę na fakt, że część promieniowania słonecznego jest jednak pochłaniana przez atmosferę (np. przez cząstki sadzy) i nie dociera do powierzchni Ziemi oraz, że promieniowanie to nie jedyny sposób przekazywania energii. Atmosfera nagrzewa się od powierzchni Ziemi także na drodze przewodnictwa cieplnego, unoszenia się powietrza ogrzanego przy powierzchni Ziemi (konwekcja) oraz poprzez pobieranie energii z powierzchni przez parującą wodę i uwalnianie jej wyżej w atmosferze.

CZY WIESZ, ŻE ?

- ☞ Gdyby nie efekt cieplarniany, średnia temperatura powierzchni Ziemi byłaby o ponad 30 stopni niższa.

rze, gdy para wodna się skrapla (ciepło utajone). Ponadto fale podczerwone z pewnego wąskiego zakresu długości (zwanego oknem atmosferycznym) nie są absorbowane przez gazy cieplarniane, przez co bez problemu uciekają w kosmos. Warto zdawać sobie sprawę z tych procesów, jednak nie są one kluczowe dla zrozumienia samej idei efektu cieplarnianego.

Uśredniony (dla całej planety i całego roku) bilans energetyczny atmosfery uwzględniający wszystkie wspomniane wyżej efekty przedstawia rysunek poniżej. Jak widzisz, bilans nie jest obecnie zrównoważony. Ziemia emituje mniej energii w kosmos niż otrzymuje od Słońca. Właśnie tego dotyczyć będzie nasz kurs.

**Właśnie tego
dotyczyć będzie
nasz kurs.**

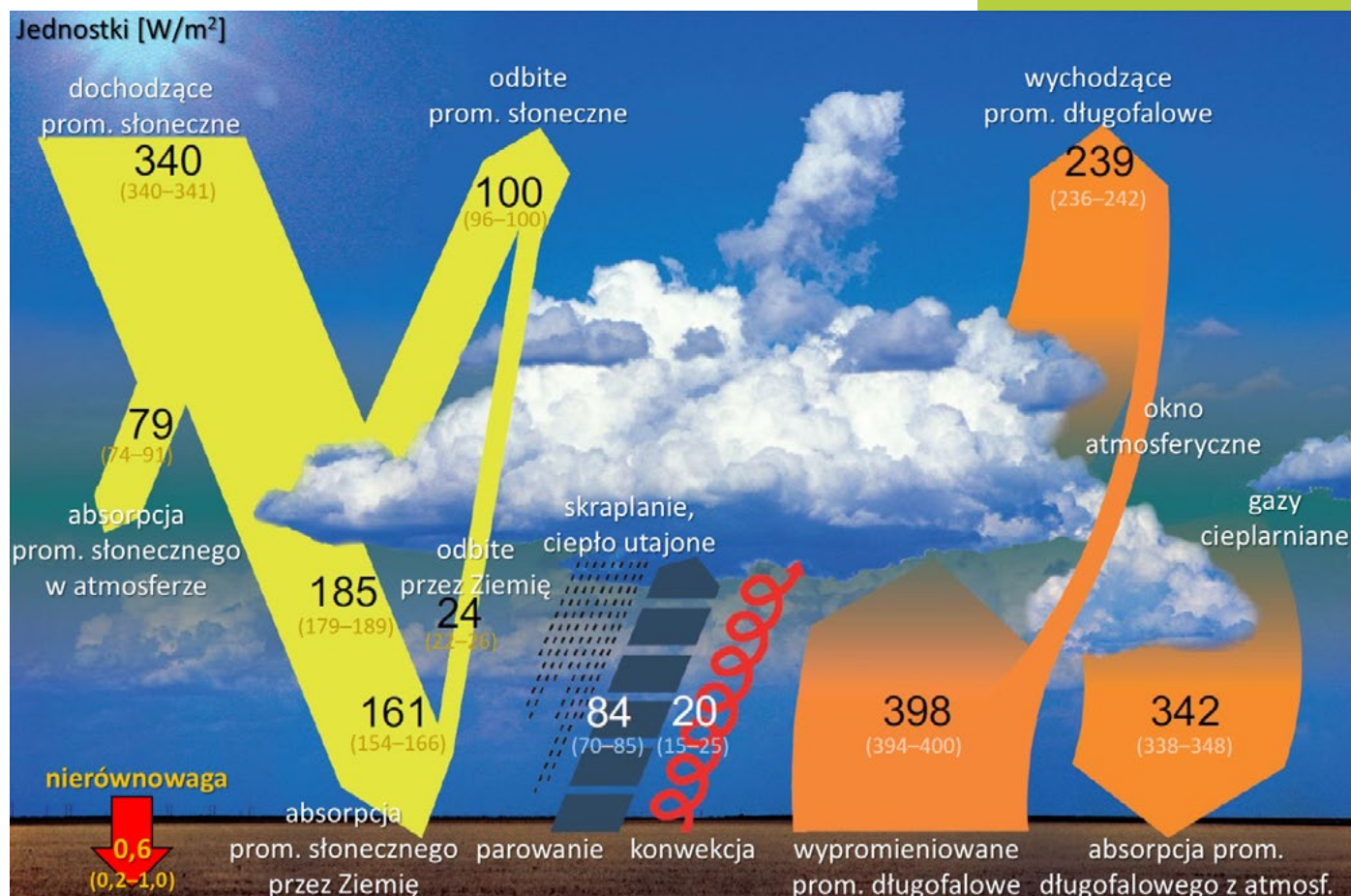
Jeśli chcesz poznać efekt cieplarniany dokładniej, zajrzyj do tekstu:



Efekt cieplarniany
– jak to działa? »

Rysunek 1: Aktualny, wieloletni średni bilans energetyczny atmosfery wyrażony w watach na jednostkę powierzchni planety (W/m^2). Wartości podano wraz z zakresem niepewności (nawiasy). Poszczególne składowe bilansu charakteryzują się znacznym zakresem niepewności, ale ich różnice (np. nierównowaga bilansu radiacyjnego) są znane z dużą dokładnością.

Źródło: Wild i in., 2013

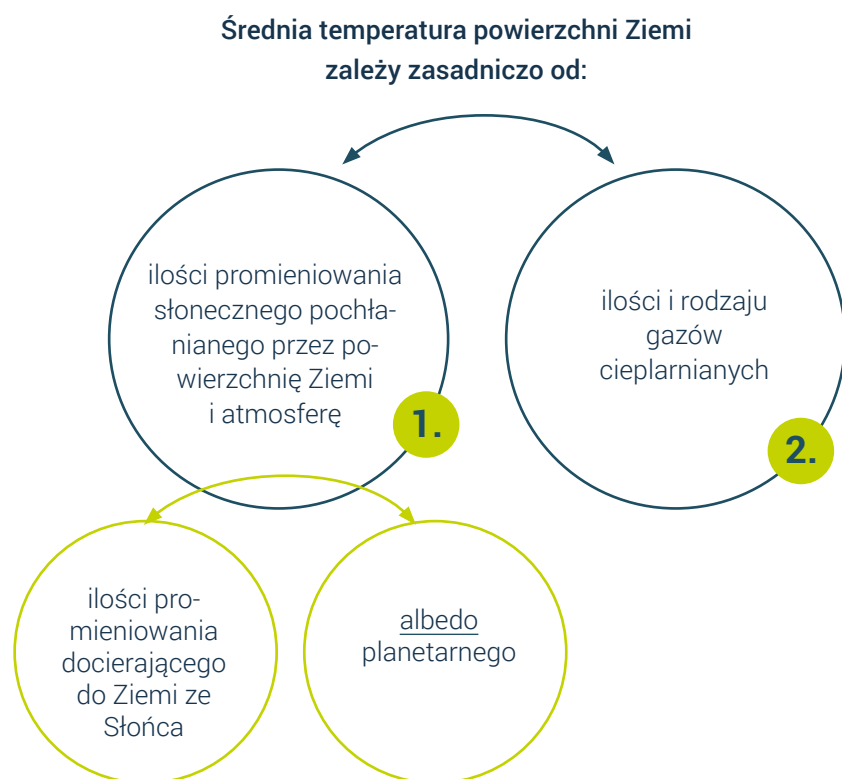


Co się dzieje, gdy zaburzymy bilans energetyczny atmosfery?

Średnia temperatura powierzchni Ziemi zależy od ilości pochłanianego przez nią promieniowania słonecznego i składu atmosfery (nasilenia efektu cieplarnianego).

Wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze prowadzi do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi (ocieplenia klimatu).

Jak już wiesz, pierwotnym źródłem energii dla zachodzących na powierzchni Ziemi procesów jest promieniowanie słoneczne, a dla bilansu energetycznego planety kluczowe znaczenie ma efekt cieplarniany.



ALBEDO PLANETARNE – wielkość mówiąca, jaka część promieniowania gwiazdy (w przypadku Ziemi – Słońca) jest rozpraszana w kosmos łącznie przez powierzchnię planety i wszystkie składniki jej atmosfery (np. chmury, pyły).



CZY WIESZ, ŻE ?

☞ Ciepło płynące z głębi naszej planety jest zanedbywalnie małe w porównaniu z ilością energii docierającą do Ziemi ze Słońca. To dlatego pomijamy je w naszych rozważaniach.

albedo
wielkość mówiąca, jaka część promieniowania jest rozpraszana wstecz (odbijana) przez wybrany obiekt czy powierzchnię. Im większe albedo, tym większa część promieniowania jest rozpraszana (odbijana), a mniejsza – pochłaniana.

DEFINICJA
ALBEDO PLANETARNE



ALBEDO

Lód ma duże albedo (odbija dużą część padającego na niego promieniowania słonecznego) i dlatego widzimy, że jest bardzo jasny.

Woda ma małe albedo (pochłania większość padającego na nią promieniowania słonecznego) i dlatego widzimy ją jako ciemną.

Albedo zależy od długości i kąta padania promieniowania. Jeśli nie są one wspomniane, to znaczy, że mowa o wartościach średnich.

1.

Co się dzieje...

gdy zmieni się ilość promieniowania słonecznego pochłanianego przez Ziemię?

● **Jeśli ilość promieniowania słonecznego docierającego do naszej planety wzrośnie lub jej albedo planetarne spadnie, Ziemia się nagrzeje.**

Energia gromadzi się na jej powierzchni – lądach i oceanach – i w atmosferze, dopóki nie osiągną one temperatury na tyle wysokiej, by wypromieniowały w kosmos tyle samo energii, ile otrzymują od Słońca.

● **Jeśli ilość promieniowania słonecznego docierającego do naszej planety spadnie lub jej albedo planetarne wzrośnie, Ziemia się wychłodzi.**

Planeta cały czas pozbywa się energii, promieniując. Zmniejszona absorpcja promieniowania słonecznego oznacza jednak, że straty energii nie są równoważone. Stopniowo więc ilość energii zgromadzonej na powierzchni planety i w atmosferze spada, a wraz z nią średnia temperatura. W efekcie Ziemia promieniuje coraz słabiej, aż w końcu ilości energii absorbowanej i emitowanej wyrównują się.

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 Albedo świeżego śniegu jest nawet 10 razy większe niż albedo wody.

2.

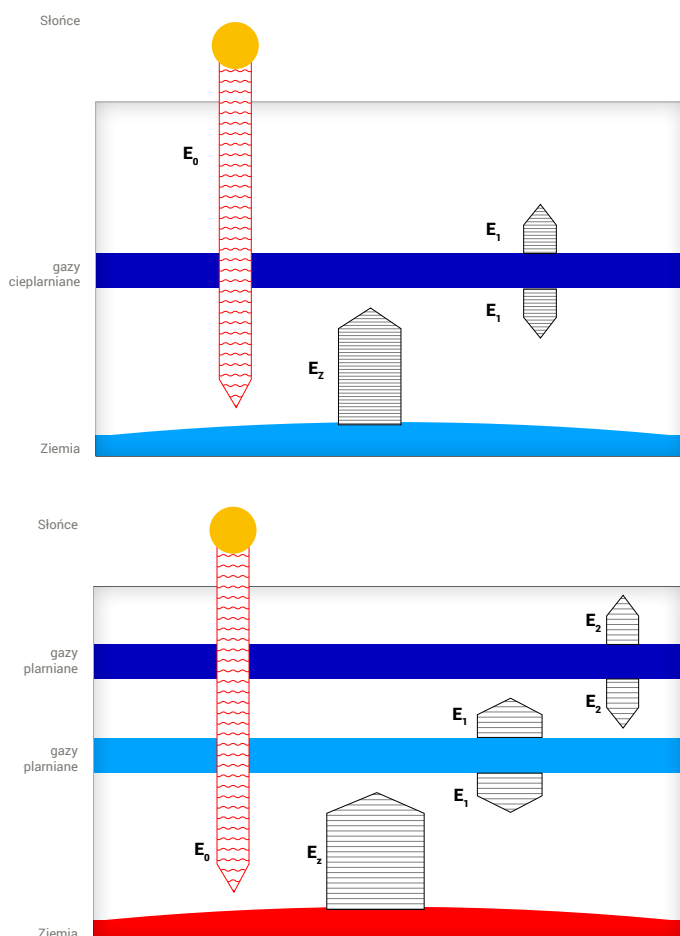
Co się dzieje...

gdy zmieni się ilość gazów cieplarnianych w atmosferze?

Gdy w atmosferze przybędzie gazów cieplarnianych, Ziemia się nagrzeje.

Chociaż planeta pochłania wciąż tyle samo energii słonecznej, pozbywanie się energii przez powierzchnię Ziemi jest utrudnione. Więcej gazów cieplarnianych oznacza, że dolne warstwy atmosfery wydajniej pochłaniają promieniowanie ziemskie. Ilość energii emitowanej z górnych partii atmosfery w kosmos staje się przejściowo mniejsza niż ilość energii otrzymywanej od Słońca. Różnica jest zużywana na ogrzewanie atmosfery. Wraz ze wzrostem temperatury atmosfery rośnie też ilość promieniowania emitowanego przez nią w stronę powierzchni planety. W rezultacie wzrastają także temperatura i ilość energii emitowanej przez powierzchnię Ziemi. Trwa to do momentu, gdy uda się ponownie zrównoważyć ilości energii absorbowanej przez planetę i emitowanej w przestrzeń kosmiczną. Po osiągnięciu tego stanu, średnia temperatura ustabilizuje się na nowym, wyższym poziomie.

Rysunek 2: Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery, ułatwiający wyobrażenie sobie, co oznacza zwiększenie ilości gazów cieplarnianych w atmosferze.



E_0 energia promieniowania słonecznego
 E_z energia promieniowania ziemskiego
 E_1, E_2 energia promieniowania kolejnych warstw gazów cieplarnianych

Sytuacja wyjściowa, wszystkie gazy cieplarniane w atmosferze zastępujemy pojedynczą warstwą („szybą”).

Podwojenie ilości gazów cieplarnianych przedstawione jako dodanie drugiej warstwy.

Zakładamy, że warstwy gazów cieplarnianych pochłaniają całe promieniowanie podczerwone, które dociera do nich z dołu czy z góry. Aby bilans energetyczny był zachowany, ilość energii pochłanianej przez Ziemię musi być równa ilości energii wychodzącej z górnej warstwy atmosfery w przestrzeń kosmiczną. Wymaga to wzrostu temperatury niższej warstwy oraz temperatury powierzchni Ziemi. $E_2 = E_0$, $E_1 = 2E_0$, $E_z = 3E_0$

Pamiętaj, w rzeczywistości gazy cieplarniane nie tworzą w atmosferze wyodrębnionych warstw.

CZY WIESZ, ŻE ?

☞ Gazy cieplarniane są „dobrze wymieszane” w atmosferze, czyli ich stężenia na różnych wysokościach są zbliżone. Wyjątkiem jest para wodna, która na pewnej wysokości się skrapla.

**Gdy z atmosfery ubędzie gazów cieplarnianych,
Ziemia się wychłodzi.**

Choć ze Słońca dociera cały czas tyle samo energii, to pozbywanie się energii przez Ziemię energii jest ułatwione. Mniej gazów cieplarnianych oznacza, że atmosfera słabiej pochłania promieniowanie podczerwone emitowane z powierzchni. Ponieważ jednak sama atmosfera nadal promieniuje, zawartość zgromadzonej w niej energii spada i atmosfera się ochładza. W efekcie spada także ilość promieniowania podczerwonego docierającego do powierzchni planety, a jej temperatura obniża się. Trwa to tak długo, aż ilość energii wypromieniowywanej w kosmos zrówna się z ilością pochłanianą przez planetę energii słonecznej. Po osiągnięciu tego stanu, średnia temperatura ustabilizuje się na nowym, niższym poziomie.

CZY WIESZ, ŻE ?

📖 Czy wiesz, że efekt cieplarniany oraz konsekwencje wzrostu lub spadku koncentracji gazów cieplarnianych opisano już w XIX wieku.



Poczytaj i posłuchaj
o historii badań klimatu »



Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym Ziemi

Zjawiska wpływające na klimat mogą mieć charakter wymuszeń lub sprzężeń. Sprzężenia mogą nasilać lub osłabiać zmiany zapoczątkowane przez wymuszenia.

Z poprzednich rozdziałów wiesz już, że zmiana średniej temperatury powierzchni Ziemi to efekt zaburzenia bilansu energetycznego Ziemi, czyli przyrostu lub ubytku energii w systemie klimatycznym.

SYSTEM KLIMATYCZNY ZIEMI – łączna nazwa dla atmosfery, hydrosfery, kriosfery, biosfery i powierzchniowej warstwy litosfery, ich elementów i zachodzących w nich procesów

DEFINICJA
SYSTEM KLIMATYCZNY
ZIEMI

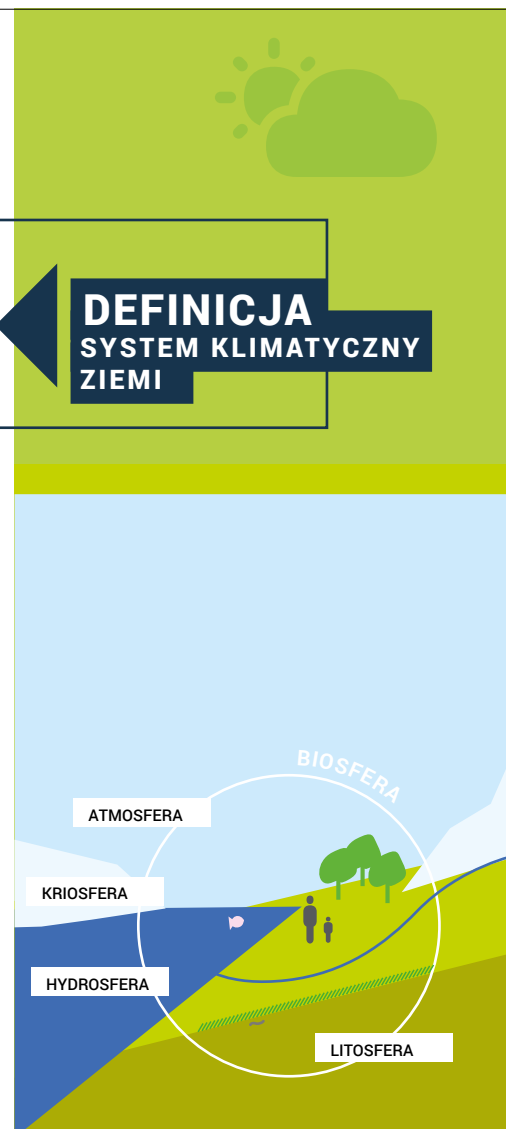
Atmosfera to gazowa powłoka Ziemi. Rozciąga się od powierzchni planety, a jej górna granica jest umowna (im wyżej, tym powietrze staje się rzadsze i atmosfera stopniowo przechodzi w próżnię). Gdyby atmosfera miała gęstość taką jak woda, utworzyłaby na powierzchni Ziemi warstwę grubości zaledwie 10m. 90% masy atmosfery znajduje się poniżej wysokości 20km, tu zachodzi także większość zjawisk pogodowych.

Hydrosfera to wszystkie wody znajdujące się na Ziemi – oceany, jeziora, rzeki, wody podziemne, para wodna w atmosferze, a także wszelkie ciała lodowe (elementy kriosfery). 97% wody znajduje się w oceanie, który pokrywa ponad 70% powierzchni planety i stanowi wielki zbiornik energii (ponad 90% energii gromadzącej się na Ziemi w związku ze zmianą koncentracji gazów cieplarnianych trafia właśnie tutaj). Przepływy ciepłej i chłodnej wody oceanicznej wpływają na warunki pogodowe panujące w poszczególnych częściach świata. Także parowanie i skraplanie wody pozwala na przenoszenie energii (pobieranej w miejscu parowania i uwalnianej tam, gdzie para się skrapla). Nie można zapominać także, że para wodna to istotny gaz cieplarniany, a obecność chmur lub śniegu ma zasadnicze znaczenie dla albedo.

Kriosfera ma wiele części wspólnych z hydrosferą, bo obejmuje lodowce, lądolody, śnieg, lód na powierzchni oceanu i wieloletnią zmarzlinę. Obecnie ok. 3% energii, której przybywa na Ziemi w związku z wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych, jest zużywana na topnienie lodów. Topnienie lodów dostarcza do oceanów dużych ilości słodkiej wody, co może zaburzać krążenie wody w oceanie. Lód i śnieg interesują nas także dlatego, że mają wysokie albedo.

Biosfera to przestrzeń zajmowana przez organizmy żywe na Ziemi (obejmuje części wszystkich pozostałych sfer), ale także wszystkie zamieszkujące Ziemię organizmy. Mogą one przyczyniać się do emisji gazów cieplarnianych, ich pochłaniania, zmian albedo i stosunków wodnych.

Litosfera to „twarda ziemia”, po której chodzimy, rozciągająca się od powierzchni Ziemi, obejmująca jej skorupę i górny płaszcz. Jej ukształtowanie wpływa na przepływy powietrza i wody, a powierzchnia na albedo planetarne. Powierzchniowa warstwa litosfery obejmuje skały podlegające wietrzeniu chemicznemu – zjawisku, w ramach którego dwutlenek węgla jest usuwany z atmosfery.



System klimatyczny Ziemi jest bardzo złożony, między jego elementami występuje wiele interakcji, na przykład:

- ocean przekazuje atmosferze parę wodną w wyniku parowania,
- wiatr powoduje wywiewanie pyłów z powierzchni Ziemi,
- glony pojawiające w dużej ilości na powierzchni lądolodu zmieniają jego albedo.

Te i wiele innych procesów może mieć znaczenie dla bilansu energetycznego Ziemi. Dlatego gdy zastanawiamy się nad przyczynami konkretnej zmiany klimatu, warto zwrócić uwagę, które z nich mają charakter pierwotny, a które same w sobie są już efektem wcześniejszych zmian w systemie klimatycznym.

WYMUSZENIA to wpływające na klimat zjawiska pochodzące z zewnątrz systemu klimatycznego.

DEFINICJA WYMUSZENIA

Najbardziej oczywistymi przykładami wymuszeń klimatycznych są czynniki astronomiczne, takie jak zmiany aktywności Słońca lub orbity Ziemi. Jako wymuszenie traktujemy także efekty aktywności wulkanicznej oraz działalności człowieka – zmiany atmosferycznych koncentracji gazów cieplarnianych lub zapylenia atmosfery wskutek spalania paliw kopalnych i nie tylko. O występowaniu pierwszych decydują przede wszystkim zjawiska zachodzące w głębi Ziemi, a o drugich – ludzkie decyzje i możliwości techniczne.

Po wystąpieniu wymuszenia w systemie klimatycznym może zacząć się cały łańcuch zmian, wtórnie wpływających na bilans energetyczny.

zmiany aktywności Słońca

Aktywność słoneczna to zjawiska zachodzące na Słońcu powodujące zmiany w natężeniu emitowanego przez nie promieniowania.

zmiany orbity Ziemi

Orbita ziemską cyklicznie zmienia swój kształt: na zmianę staje się bardziej kolista i bardziej owalna. Cyklicznie zmienia się także nachylenie osi ziemskiej do płaszczyzny jej orbity oraz orientacja osi względem Słońca. Skutkuje to zmianami w nasłonecznieniu bieguna północnego.

SPRZĘŻENIA to wpływające na klimat zjawiska zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego, będące skutkiem działania wymuszeń.

DEFINICJA SPRZĘŻENIA

Do najbardziej oczywistych sprzężeń należą na przykład zmiany w nasileniu parowania albo zasięgu lodu unoszącego się na powierzchni oceanu w wyniku spowodowanego wymuszeniem wzrostu lub spadku temperatury powietrza i oceanu. Zmiany w parowaniu prowadzą do zmian w nasileniu efektu cieplarnianego (para wodna jest gazem cieplarnianym), a zmiany w zasięgu lodu – do zmiany albedo planetarnego.

Zjawiska zachodzące w systemie klimatycznym w reakcji na wymuszenia mogą potęgować lub hamować zaburzenia, przez które zostały uruchomione.

UJEMNE SPRZĘŻENIE KLIMATYCZNE to odpowiedź systemu klimatycznego osłabiająca działanie wymuszenia.

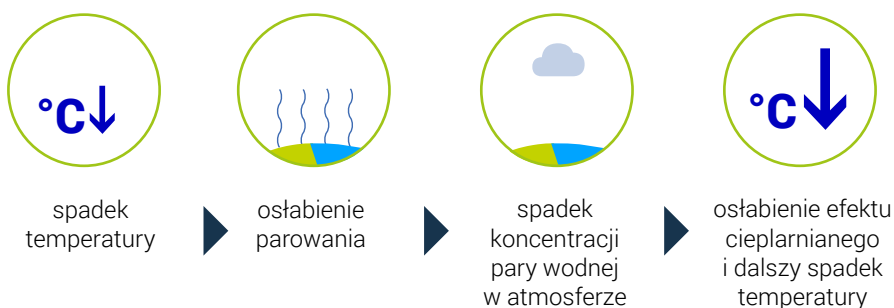
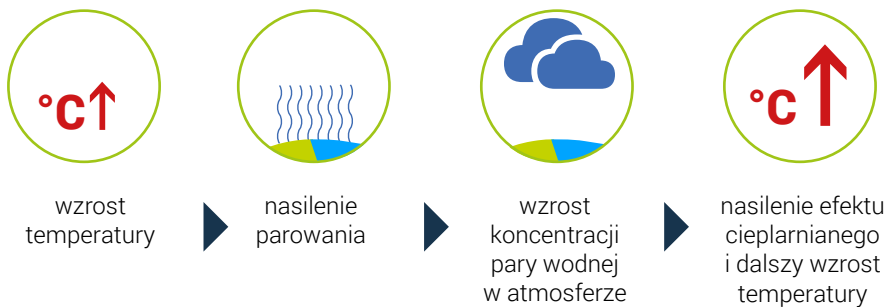
DEFINICJA UJEMNE SPRZĘŻENIE KLIMATYCZNE

Przykładem ujemnego sprzężenia jest wzrost ilości energii wypromieniowywanej przez planetę w wyniku wzrostu jej temperatury – spowalnia to wzrost temperatury i stabilizuje system.

DODATNIE SPRĘŻENIE KLIMATYCZNE to odpowiedź systemu klimatycznego wzmacniająca działanie wymuszenia.

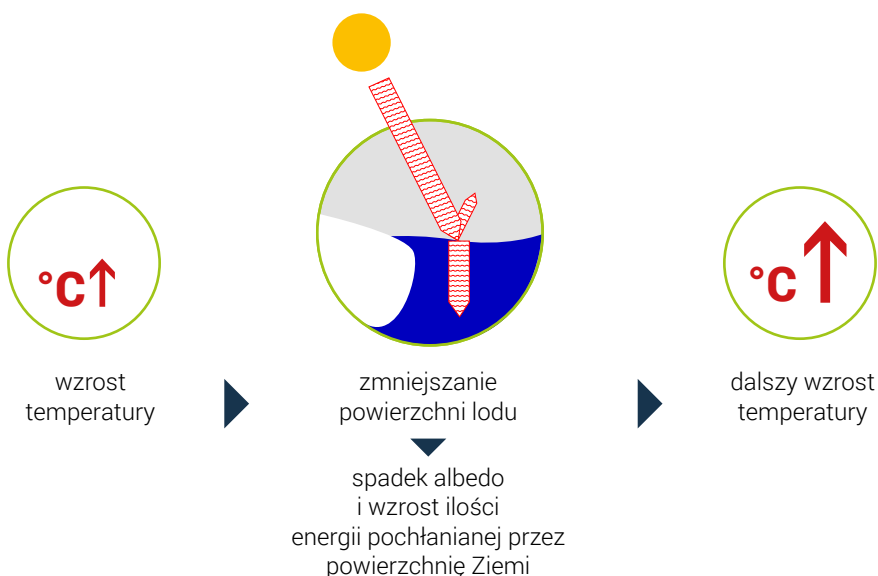
DEFINICJA
DODATNIE
SPRĘŻENIE
KLIMATYCZNE

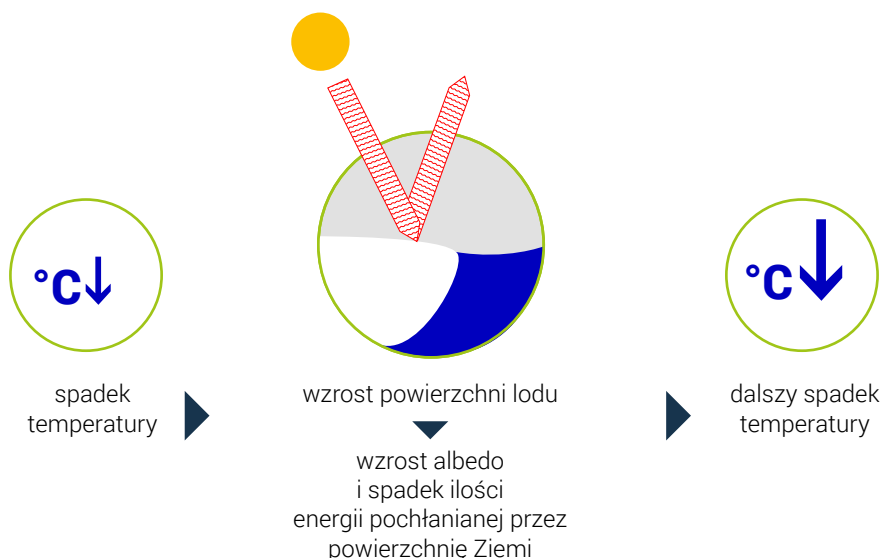
Bardzo ważnym sprzężeniem dodatnim w systemie klimatycznym Ziemi są zmiany w intensywności parowania wody i zawartości pary wodnej w atmosferze:



Silne sprzężenie dodatnie może zdestabilizować układ, wprowadzając go w inny stan.

Innym przykładem jest zachowanie lodu morskiego (unoszącego się na powierzchni wody) w Arktyce. Ponieważ albedo lodu jest dużo większe niż albedo wody:





UWAGA!

To samo zjawisko może mieć charakter wymuszenia lub sprzężenia – zależnie od przyczyny. Na przykład wzrost koncentracji dwutlenku węgla może być:

- wymuszeniem, jeśli jest powodowany przez spalanie paliw kopalnych przez człowieka (węgiel w paliwach – skałach osadowych – pochodzi spoza systemu klimatycznego),
- sprzężeniem, jeśli jest efektem zamierania roślinności lub odgazowywania oceanu w wyniku wcześniejszego wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi.

✎ W atmosferze oprócz gazów znajdują się także większe cząstki stałe lub płynne. Należą do nich pyły, kryształki soli morskiej, zarodniki roślin, kropelki kwasów i wiele innych.

✎ Działalność człowieka przyczynia się nie tylko do emisji gazów cieplarnianych, ale także pyłów i rozmaitych związków, które w wyniku reakcji chemicznych tworzą potem unoszące się w powietrzu drobne kropelki roztworów.

✎ Zawieszone w atmosferze cząstki mogą sprzyjać: **OCHŁADZANIU KLIMATU**, jeśli odbijają promieniowanie słoneczne (np. pyły, kropelki kwasu siarkowego), **OCIEPLANIU KLIMATU**, jeśli je pochłaniają (np. sadza).



Więcej o różnego typu sprzężeniach w systemie klimatycznym przeczytasz w tekstach:

Arktyczne wzmocnienie »

Para wodna – klimatyczny „dopalacz” »

Chmury, klimat i przyspieszony wzrost temperatur »

Przesunięte chmury »

Groźne sprzężenie zwrotne: ocieplenie zubaża gleby, ich węgiel trafia do atmosfery »

Źródło: Iceberg floating on Pine Island Bay on Nov. 4, 2012
Credit: NASA/Maria-José Viñas



Więcej na ten temat dowiesz się z kolejnej lekcji, dotyczącej obiegu węgla w przyrodzie.

Punkty krytyczne w systemie klimatycznym Ziemi

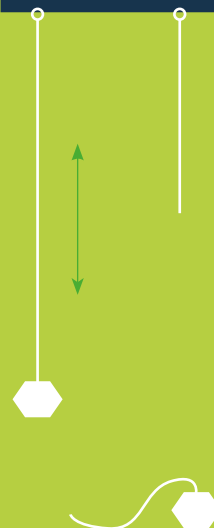
Po przekroczeniu punktu krytycznego w systemie klimatycznym zachodzą znaczące i nieodwracalne zmiany.

Wyobraź sobie ciężarek zawieszony na gumce. W naturalny sposób znajduje się on na konkretnej wysokości – tej, na której równowagę się działająca w dół siła grawitacji i przeciwdziałająca jej siła sprężystości gumki. Jeśli pociągniesz ciężarek lekko w dół, nic specjalnego się nie wydarzy: będzie znajdował się trochę niżej, a gdy go puścisz, przez chwilę będzie poruszał się „górze – dół”, ale w końcu powróci do swojego pierwotnego położenia – punktu równowagi. Jeśli jednak pociągniesz za ciężarek mocniej, tak że doprowadzisz do zerwania gumki, sytuacja nie powróci już do punktu wyjścia. Gdy wypuścisz ciężarek z ręki – spadnie na ziemię.

Moment zerwania gumki to moment, w którym układ przekroczył punkt krytyczny i zaczął dążyć do nowego stanu równowagi. Takiego, w którym siłę grawitacji działającą na ciężarek równoważy siła reakcji podłoża na jego nacisk. Teraz, nawet jeśli podniesiesz ciężarek, ponownie opadnie on na ziemię.

W systemie klimatycznym Ziemi zidentyfikowano wiele zjawisk, które w odpowiedzi na zmianę klimatu zachowują się podobnie jak opisany wyżej układ z gumką i ciężarkiem. W miarę jak średnia temperatura powierzchni Ziemi rośnie, obserwujemy, jak stopniowo postępują. Gdyby ocieplenie ustało, prawdopodobnie by się zatrzymały. Jeśli jednak temperatura wzrośnie za bardzo, przekroczą swoje punkty krytyczne, co skutkuje nieuchronnymi, znacznymi i bezpowrotnymi zmianami. Ten efekt jest na ogół związany z występowaniem sprzężenia nasilającego zjawisko.

ANALOGIA



PUNKT KRYTYCZNY – progowa wartość jakiegoś parametru, po przekroczeniu której zmieni się stan równowagi systemu.

DEFINICJA PUNKTU KRYTYCZNEGO

PRZYKŁADY

Jak już wiesz, **topnienie lodu morskiego w Arktyce** to przykład sprzężenia dodatniego: wzrost temperatury oznacza mniej lodu, mniejsza powierzchnia lodu sprzyja pochłanianiu promieniowania słonecznego i dalszemu ociepleniu. Jeśli powierzchnia lodu bardzo zmaleje, już sam ten efekt wystarczy do stopienia reszty.

Wieloletnia zmarzlina to warstwa gleby pozostająca w temperaturze poniżej zera przez wiele lat. Wzrost średniej temperatury oznacza, że zaczyna ona rozmarzać. Wtedy zgromadzone w niej szczątki organiczne zaczynają się rozkładać, co skutkuje emisjami metanu i dwutlenku węgla. Te gazy nasilają efekt cieplarniany, w rezultacie zwiększa się więc ocieplanie się klimatu (to kolejny przykład dodatniego sprzężenia zwrotnego). Gdy odpowiednio duża objętość wieloletniej zmarzliny rozmarznie, związane z tym emisje gazów cieplarnianych wystarczą, aby podnieść temperaturę i doprowadzić do rozmarznięcia reszty.

Topnienie lodowców Antarktydy Zachodniej to przede wszystkim efekt nadtapiania ich przez coraz cieplejszą wodę oceaniczną. Gdy klimat jest stabilny, opady śniegu w głębi lądolodu wystarczają do odbudowywania strat jego masy związanych z tym, że lód stale spływa do oceanu, gdzie topnieje oraz odrywają się od niego kolejne góry lodowe. Gdy temperatura wody rośnie, topnienie robi się bardziej intensywne i czoło lodowca cofa się (przesuwa bliżej lądu lub w jego głąb).

Ląd, na którym spoczywa lód Antarktydy Zachodniej, jest specyficznie ukształtowany – znajduje się poniżej poziomu morza, a im bliżej bieguna, tym bardziej się obniża. To oznacza, że im bardziej cofa się lód, tym większa jest powierzchnia, którą styka się z wodą i coraz szybciej topnieje (patrz rysunek). Ułatwia to jednocześnie spływanie kolejnych porcji lodu z głębi lądolodu. Lodowce w tym regionie prawdopodobnie już cofnęły się na tyle, że ich spływania do oceanu nie da się zatrzymać, czyli tempo ich spływania znacznie przekracza tempo odtwarzania przez opady śniegu.

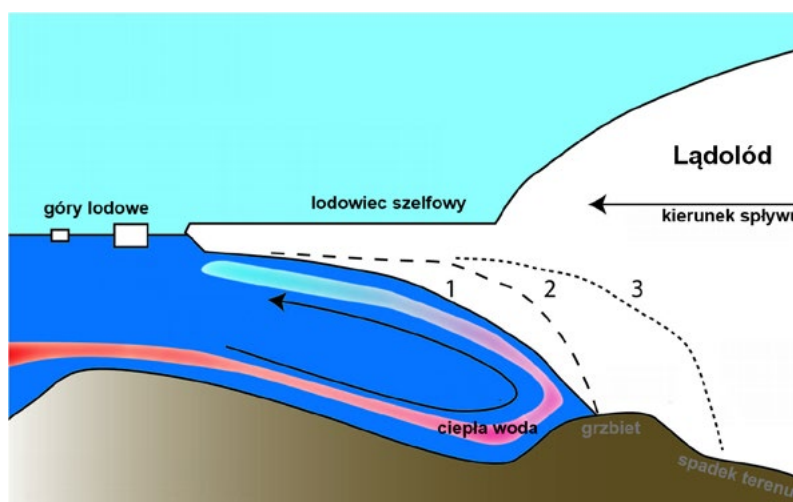


Więcej o lodowcach przeczytasz w tekście:

Czym nie jest lodowiec? »

a o tym, co dzieje się na Antarktydzie w artykule:

Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony »



Rysunek 3: Schematyczne przedstawienie topnienia spływającego z lądu lodowca pod wpływem kontaktu z coraz cieplejszą wodą. W sytuacji równowagi napływ lodu z głębi lądu równoważy topnienie oraz odłamywanie się gór lodowych. Gdy temperatura wody rośnie, topnienie staje się coraz wydajniejsze i lodowiec ulega skróceniu („cofa się”). Linie oznaczone numerami 1, 2, 3 pokazują kolejne powierzchnie styku lodu z wodą (kolejno coraz większe). Różnica między linią 2 i 3 pokazuje efekt związany ze spadkiem terenu.

Źródło: AntarcticGlaciers.org, tłumaczenie za Naukaoklimacie.pl.

W POSZUKIWANIU PUNKTU KRYTYCZNEGO

Mając informacje o materiale, z którego wykonano gumkę, o jej długości i szerokości, inżynier jest w stanie obliczyć w przybliżeniu krytyczną długość, po rozciągnięciu do której gumka powinna pęknąć. W praktyce może się jednak okazać, że materiał z tej konkretnej partii był trochę mniej lub bardziej wytrzymały niż zwykle, że ktoś niepostrzeżenie naderwał gumkę itp. Dlatego zanim punkt krytyczny zostanie przekroczony, da się go wyznaczyć tylko w przybliżeniu – podać zakres, w którym prawdopodobnie się znajduje.

ANALOGIA CD



Wyznaczenie punktów krytycznych wielkoskalowych zjawisk, takich jak zanik lodu morskiego czy zaburzenia cyrkulacji oceanicznej, jest jeszcze większym wyzwaniem niż w przypadku przykładu z ciężarkiem na gumce. Wymaga bardzo dokładnego zbadania wielu aspektów, np. fizycznych lub biologicznych mechanizmów rządzących wybranym zjawiskiem, ukształtowania terenu, warunków geologicznych, wodnych itd. – zależnie od zjawiska. A nawet gdyby udało się je zbadać, to wciąż pozostanie element przypadkowy – na przykład mimo że średnia temperatura powierzchni Ziemi nie wzrośnie powyżej 1,5 stopnia względem epoki przedprzemysłowej, w Arktyce może zdarzyć się kilka wyjątkowo ciepłych lat, co wystarczy do uruchomienia sprzężeń zwrotnych. Dlatego zamiast wskazywać konkretną wartość punktu krytycznego, podajemy raczej zakres:

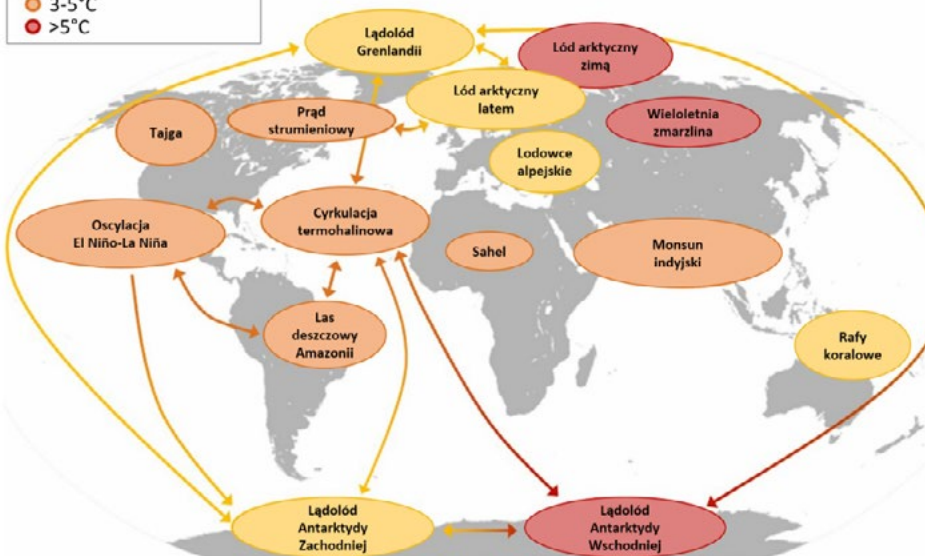
- minimum – poziom „bezpieczny”, przy którym przekroczenie punktu krytycznego jest bardzo mało prawdopodobne,
- maksimum – poziom, przy którym przekroczenie punktu krytycznego jest pewne.

Cyrkulacja oceaniczna

to ogół prądów morskich, powierzchniowych i głębinowych. Premieszczanie się dużych ilości ciepłej lub chłodnej wody wpływa na temperatury rejestrowane w poszczególnych częściach świata.

Zagrożone punkty krytyczne

- 1-3°C
- 3-5°C
- >5°C



Rysunek 4: Zjawiska i elementy, w przypadku których możliwe jest przekroczenie punktów krytycznych oraz prawdopodobne zakresy temperatur, dla których to nastąpi. Strzałki pokazują przewidywane interakcje pomiędzy zjawiskami.

Źródło: Steffen i in., (2018).

ZMIANY W SKALI PLANETARNEJ

Chociaż w przykładach wymieniliśmy poszczególne zjawiska osobno, w rzeczywistości nie zachodzą one w izolacji od reszty świata: emisje gazów cieplarnianych z wieloletniej zmarzliny nasilają także topnienie lodu w Arktyce, cofanie się lodowców Antarktydy itd. Im więcej punktów krytycznych zostanie przekroczonych, tym większe jest prawdopodobieństwo, że do nowego stanu równowagi zaczną zmierzać nie tylko poszczególne regiony i zjawiska, ale także cały system klimatyczny.

PRÓG PLANETARNY, PLANETARNY PUNKT KRYTYCZNY – progowa wartość jakiegoś parametru (na przykład temperatury), po przekroczeniu którego w całym systemie klimatycznym planety pojawiają się nieuchronne i znaczące zmiany, inaczej mówiąc, zmieni się stan równowagi, do którego dąży system.

DEFINICJA
PROGU
PLANETARNEGO



Więcej o konkretnych zjawiskach:

Arktyczne wzmocnienie »

Antarktyda jak butelka – szybko się opróżnia po odkorkowaniu »

Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony »

Ostatni spokojny fragment Grenlandii już niestabilny »

Może być niedobrze. Ekstremalna prognoza Jamesa Hansena wchodzi do kanonu nauki »

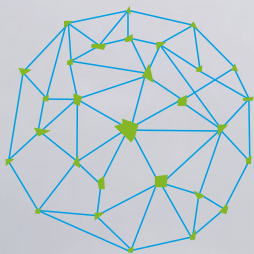
Topnienie zmarzliny niszczy lądowe magazyny węgla »

Tajga płonie. Coraz częściej »

Więcej o punktach krytycznych:

O co chodzi z „progiem wzrostu temperatury o 2°C”? »

Ziemia „stabilna” czy „cieplarniana”? »



KLIMATYCZNE ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ

Jak węgiel krąży w przyrodzie?

Dla zrozumienia, jak działa system klimatyczny Ziemi i dlaczego obecna sytuacja, w której do atmosfery bardzo szybko wprowadzamy duże ilości dwutlenku węgla, jest niebezpieczna, konieczne jest zrozumienie, jak wygląda obieg węgla w przyrodzie. Szczególnie ważne jest to, że na naszej planecie równolegle toczą się procesy działające powoli, w geologicznej skali czasowej, oraz takie, które zachodzą szybko, np. w rytmie lat i pór roku. Pierwsze należą do wolnego a drugie – do szybkiego cyklu węglowego.

Z tej lekcji dowiesz się, gdzie węgiel (pierwiastek) jest magazynowany na naszej planecie i jak krąży pomiędzy jej różnymi elementami – skałami, glebami, roślinami oraz oceanem i atmosferą. W części poświęconej wolnemu cyklowi węglowemu przeczytasz o tym, skąd wzięły się paliwa kopalne (takie jak ropa, węgiel i gaz ziemny) oraz dwutlenek węgla wypuszczany przez wulkany. Przedstawimy też mechanizm nazywany „termostatem węglowym”, dzięki któremu klimat Ziemi sam się reguluje – w geologicznych skalach czasu. Z kolejnej części dowiesz się, jak ważnym graczem w obiegu węgla jest ocean, który może pochłaniać z atmosfery duże ilości CO_2 (co jednak nie pozostaje bez konsekwencji dla morskich ekosystemów). W rozdziale o ekosystemach lądowych przeczytasz o tym, jak roślinność i gleby pochłaniają oraz uwalniają węgiel oraz czemu stężenie tego gazu w atmosferze zmienia się w rytmie pór roku. Lekcję zakończymy opowieścią o tym, co się dzieje, gdy do takiego złożonego, samoregulującego się systemu wprowadzamy szybko dużą ilość dwutlenku węgla. Pokażemy, jak węgiel wędruje przez kolejne elementy systemu i jak dużo czasu potrzeba, by przepływy pomiędzy nimi (i stan klimatu) ponownie się ustabilizowały.

Węgiel na Ziemi

Węgiel to pierwiastek nieustannie krążący pomiędzy elementami przyrody – atmosferą, biosferą, hydrosferą i litosferą.

Procesy, w których bierze udział, zachodzą w różnym tempie.

PAMIĘTAJ, ŻE:

„Węgiel” to nie tylko nazwa wydobywanej spod ziemi czarnej, palnej skały osadowej, ale także pierwiastka chemicznego.

To właśnie węgla pierwiastkowego dotyczy niniejsza lekcja.

Węgiel stanowi niecały promil masy Ziemi, ale jednocześnie jest na niej wszechobecny. Nieustannie krąży pomiędzy atmosferą, zbiornikami wody, glebami, organizmami i skałami, zazwyczaj łącząc się przy okazji z atomami innych pierwiastków. Większość węgla na Ziemi to tak zwany „węgiel nieorganiczny”, czyli atomy węgla połączone w cząsteczki węglanu wapnia (CaCO_3) lub dwutlenku węgla (CO_2). Pierwsze znajdujemy w skałach wapiennych, a drugie – w wodzie i atmosferze. Te formy węgla są w warunkach ziemskich najbardziej stabilne, ale nie nadają się do zasilania procesów życiowych. Temu służą dopiero węglowodany, czyli związki węgla, wodoru i tlenu. Rośliny wytwarzają je w procesie fotosyntezy, którą w uproszczeniu można opisać następującą reakcją:



glukoza

99,7% węgla jest uwięzione w litosferze, w atmosferze znajdziemy ledwie 1,4% reszty (Lee i in., 2019). Jednocześnie, jak pokazuje ilustracja na następnej stronie, atmosfera pełni kluczową rolę w wymianie węgla pomiędzy różnymi jego rezerwuarami. To właśnie z niej pobierany jest dwutlenek węgla pochłaniany przez roślinność, oceany i w procesie wietrzenia skał, do niej powraca również CO_2 produkowany przez organizmy w procesie oddychania, uwalniany przez wody i erupcje wulkaniczne (więcej na ten temat dowiesz się z kolejnych rozdziałów). W ciągu ostatnich 10 tys. lat (od zakończenia ostatniej epoki lodowej do rewolucji przemysłowej) przepływy węgla między poszczególnymi rezerwuarami były w przybliżeniu zbilansowane. Koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze utrzymywała się w granicach 260–280 ppm, a klimat Ziemi był stosunkowo stabilny.

Węglowodany to związki, w których na każdy atom węgla przypadają dwa atomy wodoru i jeden tlenu. Można je ogólnie opisać wzorem $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$, gdzie n to liczba naturalna.

Rezerwuár to zbiornik lub zbiór obiektów, w którym znajduje się lub może znajdować duża ilość wybranej substancji, rezerwuarami węgla są na przykład atmosfera (w której przebywa pod postacią dwutlenku węgla), oceany (w wodzie unoszą się różne cząsteczki chemiczne zawierające węgiel), ogół roślinności na świecie lub w konkretnym regionie (węgiel jest wbudowany w organizmy) itd.

Koncentracje gazów śladowych w atmosferze (na przykład dwutlenku węgla) podajemy często w jednostkach:

ppm – **parts per million** – liczba cząsteczek gazu śladowego w milionie cząsteczek powietrza

ppb – **parts per billion** – liczba cząsteczek gazu śladowego w miliardzie cząsteczek powietrza

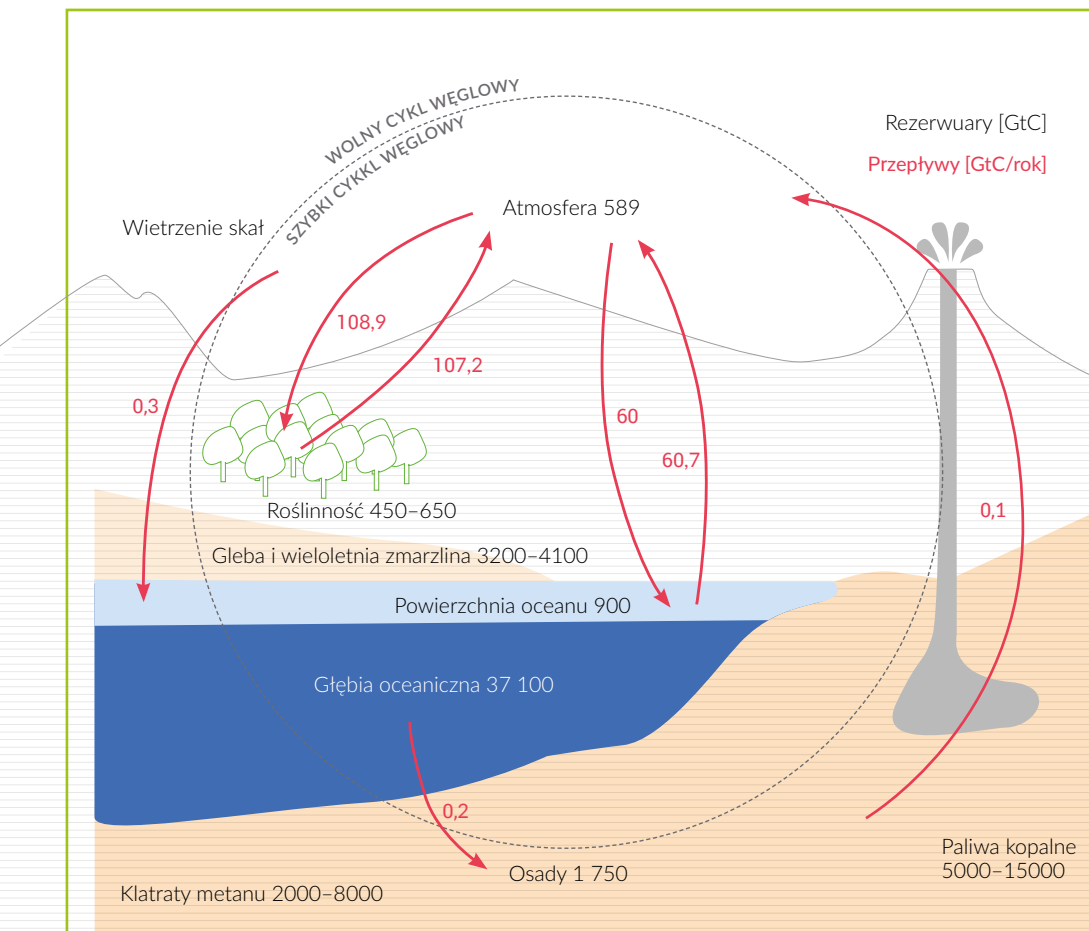
ppt – **parts per trillion** – liczba cząsteczek gazu śladowego w bilionie cząsteczek powietrza.

UWAGA!

Zwracaj uwagę na jednostki, w jakich podawana jest masa węgla lub jego związków znajdujących się lub wymienianych pomiędzy jego rezerwuarami. Mogą to być tony węgla (tC), ale także tony dwutlenku węgla (tCO_2) lub metanu (tCH_4).

1 tCO_2 odpowiada 0,27tC (odejmujemy masę atomów tlenu)

1 tCH_4 odpowiada 0,75tC (odejmujemy masę atomów wodoru)



Gt – symbol oznaczający gigatonę, czyli 1 000 000 000 ton (miliard).

Klatraty metanu to powstające w niskich temperaturach kryształy z cząsteczek wody i metanu. Na Ziemi znajdziemy je w głębi skał na Syberii, Alasce i w północnej Kanadzie oraz zagrzebane w osadach dennych na dnie oceanów w wielu regionach świata.

Wieloletnia zmarzlina – fragment skorupy ziemskiej utrzymujący się długotrwale w temperaturze poniżej 0°C.

Rysunek 1: Uproszczony diagram obiegu węgla w przyrodzie w czasach przedprzemysłowych (przed 1750 r.), z podziałem na szybki (wewnątrz koła) i wolny (na zewnątrz) cykl węglowy.

Podana jest ilość węgla znajdującego się w różnych rezerwuarach węgla (kolor czarny) oraz jego roczne przepływy (czerwone strzałki i wartości). Strzałka wychodząca z roślinności do atmosfery odpowiada oddychaniu organizmów, rozkładowi materii organicznej w glebach (oddychanie mikroorganizmów) oraz pożarom (przy czym w stabilnym ekosystemie w ciągu stulecia las odrastał, bilansując wcześniejsze emisje z pożaru). Węgiel jest usuwany z szybkiego do wolnego cyklu węglowego w procesach wietrzenia skał i akumulacji osadów oceanicznych. Powraca do niego w wyniku zjawisk wulkanicznych.

Węgiel w paliwach kopalnych oraz klatraty praktycznie nie uczestniczy w szybkim cyklu węglowym.

Źródła danych: Ciais i in., 2013 oraz Denman i in., 2007.

Jak możesz zauważyć, przyglądając się umieszczonym na rysunku liczbom opisującym przepływy węgla, niektóre procesy zachodzą w dużo większym tempie niż inne. Dlatego sensownie jest podzielić je na dwie klasy:

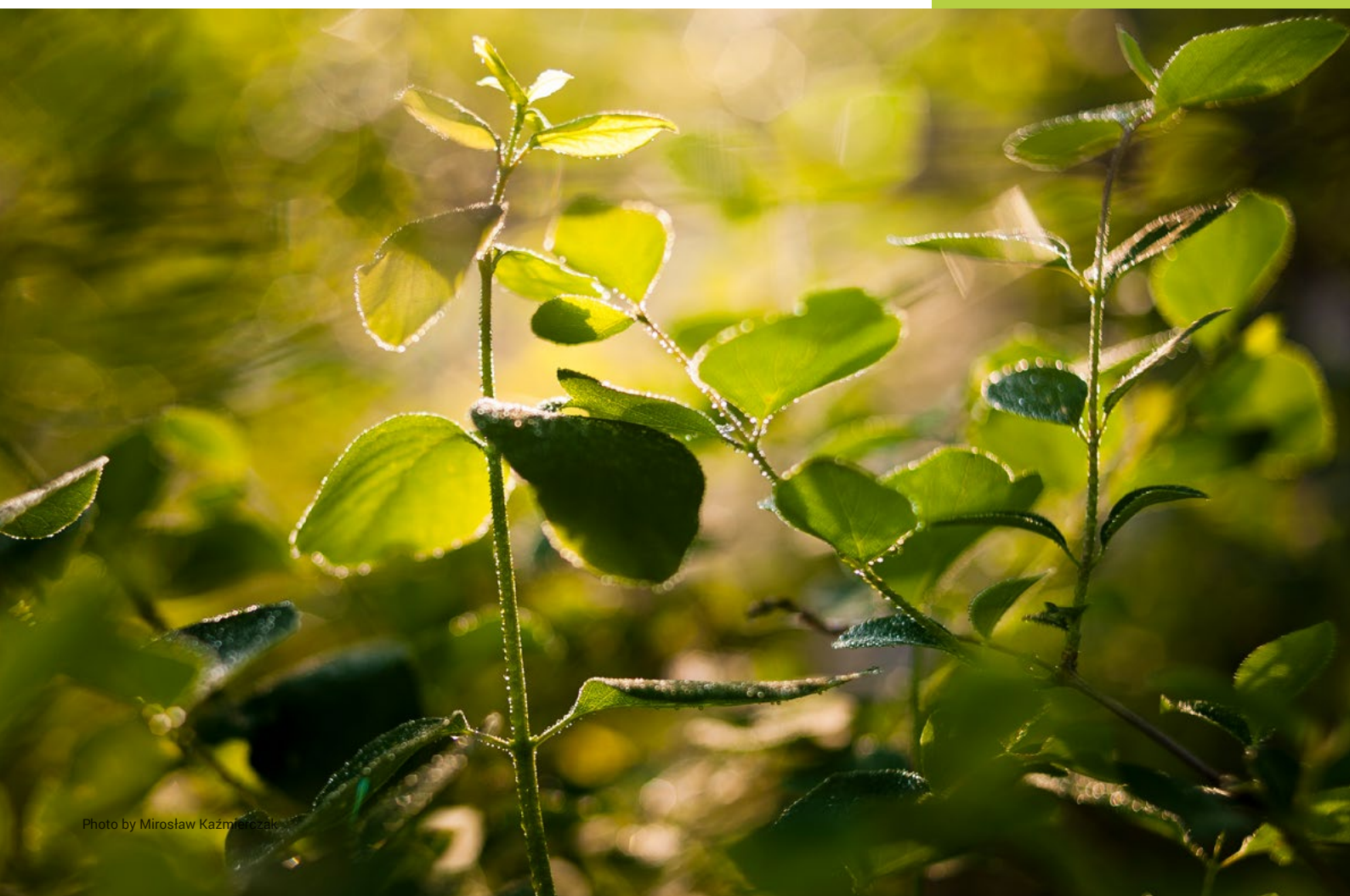
WOLNY CYKL WĘGLOWY, cykl geologiczny – procesy wymiany węgla, których skala czasowa jest długa („geologiczna”), rzędu tysięcy i setek tysięcy lat.

DEFINICJA
WOLNY CYKL WĘGLOWY

SZYBKI CYKL WĘGLOWY – procesy wymiany węgla, których skala czasowa (czyli czas potrzebny do zaobserwowania efektów zachodzących w nich zmian) jest krótka, rzędu lat lub dekad.

DEFINICJA
SZYBKI CYKL WĘGLOWY

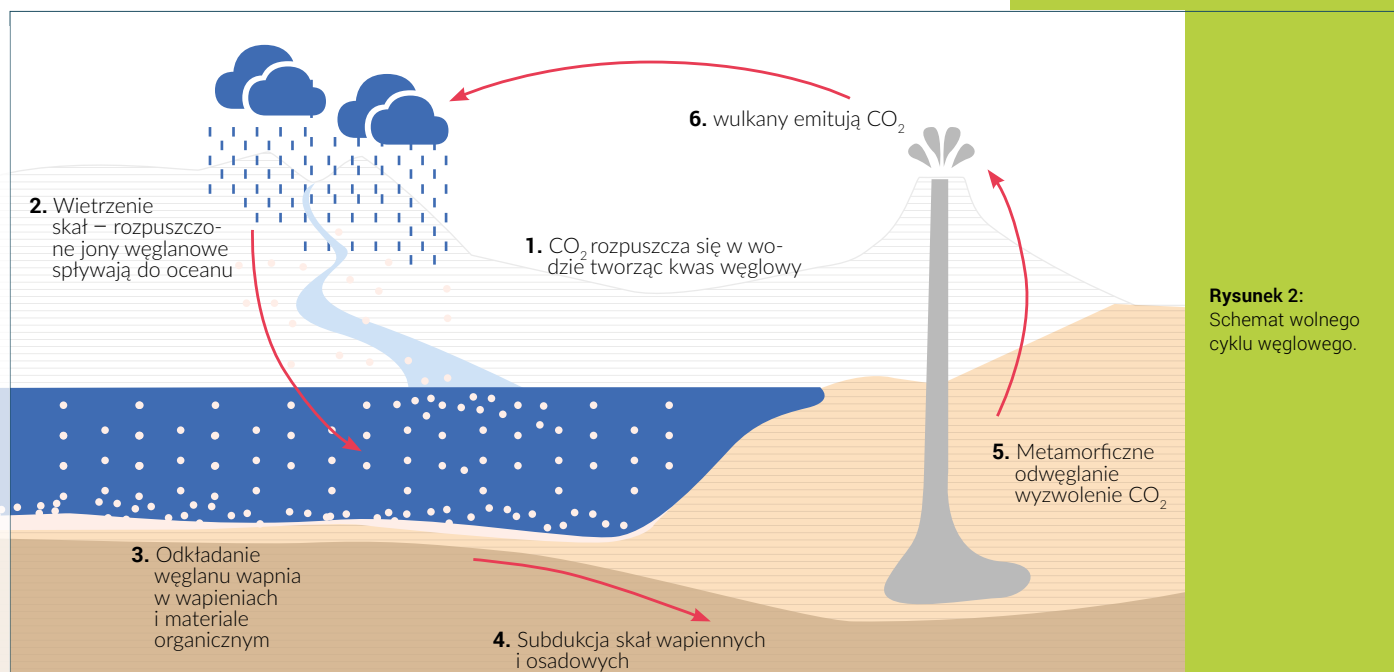
Szybki cykl węglowy obejmuje przede wszystkim wymianę węgla między atmosferą, ekosystemami lądowymi (organizmami żywymi i glebą) oraz oceanami. Stale krąży tu ponad 40 000 GtC. Naturalne procesy zmieniają tę sumę bardzo powoli: zwróć uwagę, że przepływy między szybkim a wolnym cyklem węglowym (powstawanie osadów oceanicznych, wulkanizm i wietrzenie skał) są niewielkie, a w dodatku częściowo się równoważą.



Wolny cykl węglowy i termostat węglowy

Zjawiska związane z wolnym cyklem węglowym – krążenie węgla między atmosferą a litosferą polegające na wietrzeniu skał, powstawaniu osadów morskich i wulkanizmie – regulują klimat Ziemi w geologicznych skalach czasowych.

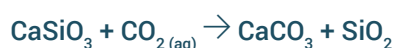
Możliwe, że słyszałeś, że jednym ze źródeł dwutlenku węgla znajdującego się w atmosferze są wulkany. Ale skąd bierze się on w gazach wulkanicznych? Przebywa długą i skomplikowaną drogę, która zaczyna się w atmosferze. W skrócie przedstawia ją rysunek poniżej.



Rysunek 2:
Schemat wolnego cyklu węglowego.

WIETRZENIE SKAŁ

Dwutlenek węgla przebywający w atmosferze rozpuszcza się w tworzących chmury kropelkach wody. Powstaje w ten sposób lekko kwaśny roztwór CO_{2(aq)}. Padający z chmur deszcz ląduje między innymi na skałach zawierających krzemian wapnia (CaSiO₃), takich jak bazalty i granity (to najpowszechniej występujące skały na Ziemi). Dochodzi wtedy do wietrzenia chemicznego, w wyniku którego powstają węglan wapnia (CaCO₃) i krzemionka (SiO₂) (Berner i Maasch, 1996). Te związki mogą wytrącać się z wody, tworząc skały osadowe.



CHEMICZNE WIETRZENIE SKAŁ – zespół reakcji chemicznych prowadzących do rozkładu skał, może obejmować m.in. rozpuszczanie, utlenianie czy uwęglanowanie.

DEFINICJA
CHEMICZNE
WIETRZENIE SKAŁ

Powstałe skały wapienne również mogą podlegać wietrzeniu chemicznemu: w kontakcie z wodą i dwutlenkiem węgla są rozbijane na jony wapniowe (Ca^{2+}) i wodorowęglanowe (HCO_3^-):



Jony wodorowęglanowe mogą dalej rozpadać się do jonów węglanowych (CO_3^{2-}):



POWSTAWIANIE OSADÓW

Produkty wietrzenia skał spływają rzekami do oceanów. Żyjące tu organizmy, takie jak koralowce, otwornice, małże i skorupiaki, wykorzystują wapń i jony węglanowe do budowy swoich muszelek lub szkieletów (na ten temat przeczytasz w kolejnym rozdziale). Gdy organizmy po jakimś czasie obumierają, ich szczątki opadają na dno oceaniczne, tworząc kolejne warstwy osadów, stopniowo zestalających się w skały.

W GŁĘB ZIEMI I NA POWIERZCHNIĘ

Skorupa ziemska składa się z kilkunastu wielkich płyt, które poruszają się względem siebie w skalach czasowych rzędu dziesiątek i setek milionów lat. W miejscach, gdzie płyty napierają na siebie, dochodzi do subdukcji – wciągania jednej pod drugą. W ten sposób warstwy osadów znajdujące się na dnie oceanicznym mogą wędrować w głąb Ziemi. Tu, pod wpływem wysokich ciśnień i temperatur, skały przeobrażają się w magmę. Dochodzi też do reakcji, w których ze skał wydobywa się dwutlenek węgla:



to ten proces opisano na rysunku na str. 37 jako odwęglanie

Zauważ, że jest to reakcja odwrotna do tej odpowiadającej za wietrzenie skał krzemianowych.

Gdy przemieszczająca się pod ziemią magma trafia w pobliże powierzchni, podlega dużo mniejszemu ciśnieniu, niż gdy przebywa głębiej. Cząsteczki dwutlenku węgla i innych związków (takich jak woda czy dwutlenek siarki) zaczynają wtedy tworzyć gazowe bąble, przemieszczać się w górę i wydostawać do atmosfery lub oceanu. Nie musi być to związane z erupcjami wulkanicznymi.

UWAGA!

Procesem o skalach czasowych charakterystycznych dla wolnego cyklu węglowego jest też powstawanie paliw kopalnych – węgla brunatnego i kamiennego, ropy oraz gazu ziemnego (także w postaci klatratów metanu).

Węgiel brunatny, a następnie **kamienny** powstają w wyniku długotrwałego odkładania się szczątków organicznych w torfowiskach, a dalej również długotrwałego przekształcania ich w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury.

Także powstawanie **ropy naftowej** zaczyna się od powolnego gromadzenia (tym razem na dnie zbiorników wodnych) osadów organicznych, przekształcanych następnie przez bakterie oraz rozmaite reakcje chemiczne zachodzące w odpowiedniej temperaturze i ciśnieniu.

Gaz ziemny (składający się głównie z metanu) powstaje często przy okazji tworzenia się węgla lub ropy naftowej. Może też występować samodzielnie, produkowany przez bakterie rozkładające materię organiczną na lądzie, w morzu lub w wyniku przekształcania materii organicznej pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia w głębi ziemi.

O ile w wyniku zjawisk takich jak ruchy tektoniczne nie dojdzie np. do rozszczelnienia złoża gazu ziemnego i ulotnienia się go do atmosfery, o tyle węgiel pierwiastkowy, odłożony w złożach geologicznych, nie bierze udziału w obiegu węgla, jest „unieruchomiony”. Naturalne procesy regulujące wymianę węgla pomiędzy rezerwuarami (opisane w tym i kolejnych rozdziałach) dopasowują swoje tempo do tej sytuacji. Większość złóż paliw na Ziemi powstała setki czy dziesiątki milionów lat temu z osadów odkładających się na przestrzeni milionów lat.

TERMOSTAT WĘGLOWY

Opisane wyżej procesy tworzą zamkniętą pętlę, w ramach której dwutlenek węgla jest jednocześnie wprowadzany i usuwany z atmosfery mniej więcej w tym samym tempie. Gdyby procesy te przez dłuższy czas nie były zrównoważone, w ziemskim klimacie mogłoby dojść do dramatycznych zmian:

- **przewaga wietrzenia skał** mogłaby doprowadzić do usunięcia z atmosfery całego znajdującego się w niej dwutlenku węgla. Spowodowałoby to ochłodzenie klimatu, które z kolei doprowadziłoby do skroplenia się i wypadnięcia z atmosfery większości pary wodnej. Stopniowo doprowadziłoby to do spadku średniej temperatury powierzchni Ziemi poniżej zera;
- **przewaga wulkanizmu** mogłaby doprowadzić do gromadzenia się dwutlenku węgla w powietrzu. Związany z tym wzrost temperatury spowodowałby nasilenie parowania i zwiększenie ilości pary wodnej



Jak możesz pamiętać z lekcji o sprzężeniach, para wodna zapewnia ważne dodatnie sprzężenie dla zmian klimatu:

- spadek temperatury powoduje nasilenie opadów, osłabienie parowania i efektu cieplarnianego,
- wzrost temperatury powoduje nasilenie parowania i efektu cieplarnianego.

w powietrzu. Te dwa procesy mogłyby spowodować ocieplenie na tyle duże, by doprowadziło do utraty wody przez Ziemię (jeśli interesuje Cię ten scenariusz, zajrzyj do tekstu „Para wodna – klimatyczny dopalacz”).

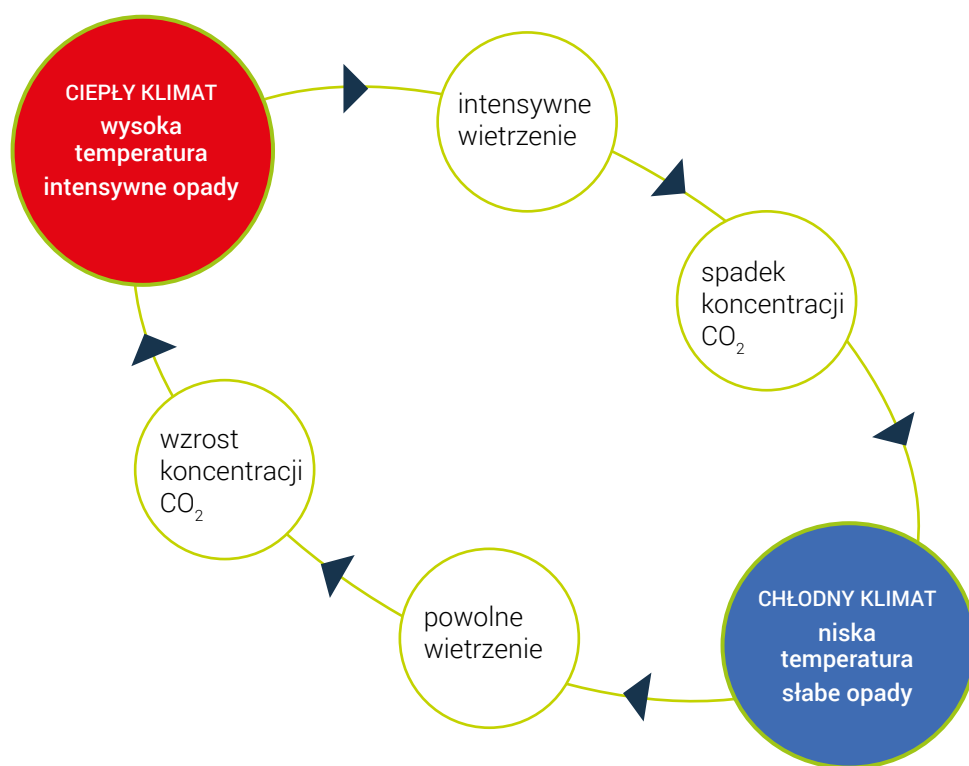
Na szczęście wystąpienie tych skrajnych scenariuszy jest mało prawdopodobne, a to dlatego, że działanie wolnego cyklu węglowego jest regulowane silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym – mechanizmem nazywanym **termostatem węglowym**.

Emisje wulkaniczne są praktycznie niezależne od aktualnego stanu klimatu, inaczej jest jednak z wietrzeniem skał. Wydajność opisanych wyżej procesów silnie zależy od temperatury i zawartości wody w atmosferze: nasilają się one przy wysokich temperaturach i intensywnych opadach (charakterystycznych dla ciepłego klimatu), a słabną w niskich temperaturach i przy słabych opadach (charakterystycznych dla chłodnego klimatu).



Dokładniej przeczytasz o tym w artykule:

Para wodna
– klimatyczny dopalacz »



Gdy więc w atmosferze pojawi się nadwyżka CO₂ (niekoniecznie spowodowana wzrostem aktywności wulkanicznej), nasili się także wietrzenie skał i nadmiar dwutlenku węgla będzie stopniowo wycofywany z atmosfery. Mechanizm termostatu węglowego działa efektywnie, jednak niezwykle wolno – stabilizacja stężenia CO₂ i klimatu po zaburzeniu trwa setki tysięcy do milionów lat.

UWAGA!

Działanie wolnego cyklu węglowego i termostatu węglowego zależy nie tylko od klimatu, ale też innych zjawisk geofizycznych, na przykład:

świeżo wypiętrzone łańcuchy górskie ulegają wietrzeniu znacznie szybciej niż równina pokryta grubą warstwą gleby chroniącej skały krzemianowe przed erozją,

ruchy płyt litosfery mogą wzmacniać aktywność wulkaniczną i emisję CO₂,

położenie i ukształtowanie decydują o tym, czy i jak intensywne opady zdarzają się w regionach występowania skał podlegających wietrzeniu oraz jakie panują tam temperatury (np. w okolicach równika jest najcieplej i sumy opadów są najwyższe),

gdy ląd ma postać jednego, wielkiego kontynentu (jak 300–180 mln lat temu), to duża jego część znajduje się z dala od oceanu i cierpi na deficyt opadów, co spowalnia wietrzenie skał; gdy ląd podzieli się na mniejsze fragmenty, większa powierzchnia znajdzie się w strefach klimatu morskiego.

Te i podobne zjawiska miały wpływ na kształtowanie się historii klimatu Ziemi.

Photo by Ben Klea on Unsplash



Węgiel w oceanach

Ilość dwutlenku węgla w powierzchniowej warstwie oceanu dostosowuje się do ilości tego związku z atmosferze. Dwutlenek węgla trafiający do oceanu uczestniczy w kolejnych reakcjach chemicznych.

Ocean to ogromny zbiornik wody (pokrywa ponad 70% powierzchni Ziemi, a jego średnia głębokość to ok. 3,7 km), a także wielki rezerwuár węgla – wielokrotnie większy niż atmosfera. Może pochłaniać dwutlenek węgla z powietrza, uwalniać go, a także – dzięki prądom morskim – rozprowadzać go po świecie. W oceanie rozgrywają się procesy o różnych skalach czasowych – zarówno te należące do wolnego cyklu węglowego (tworzenie osadów morskich, o których napisaliśmy w poprzednim rozdziale), jak i zachodzące stosunkowo szybko (wymiana cząsteczek CO_2 z atmosferą).

Spośród niemal 40 000 GtC zgromadzonych w oceanie, jedynie ok. 3 GtC ukrywa się w planktonie, rybach i innych organizmach żywych, ok. 700 GtC to rozpuszczone w wodzie związki organiczne, a znakomita większość to cząsteczki nieorganiczne:

- jony wodorowęglanowe (HCO_3^- , aktualnie blisko 90% cząsteczek),
- jony węglanowe (CO_3^{2-} , aktualnie ok. 10% cząsteczek),
- rozpuszczony dwutlenek węgla (CO_2 , aktualnie niecały 1% cząsteczek).

Proporcje między tymi związkami chemicznymi zależą od panujących w danym miejscu warunków, np. temperatury, ciśnienia, aktywności organizmów, intensywności spływu produktów wietrzenia skał z lądów.

Węgiel trafia do oceanów różnymi drogami:

- spływa rzekami w postaci jonów wodorowęglanowych (jak opisaliśmy to w materiale o wolnym cyklu węglowym),
- jest pobierany z atmosfery na drodze fotosyntezy przez unoszący się na powierzchni oceanu plankton, a następnie pożytkowany przez niego i inne organizmy tworzące morski łańcuch pokarmowy, podobnie jak dzieje się to w ekosystemach lądowych,
- CO_2 z atmosfery rozpuszcza się w wodzie i wchodzi w niej w kolejne reakcje.

Jednocześnie jest z niego stale usuwany, przede wszystkim na drodze ulatniania CO_2 do atmosfery oraz tworzenia osadów morskich.

W tym materiale skoncentrujemy się na reakcjach chemicznych zachodzących w wodzie.



CZY WIESZ, ŻE ?

📖 W latach 2009–2018 ocean pochłoniął ok. 23% dwutlenku węgla emitowanego w tym czasie w wyniku działalności człowieka (Friedlingstein i in., 2019).

Skład chemiczny i temperatura powierzchniowej warstwy oceanu (do głębokości ok. 100 m) są w przybliżeniu jednorodne, ponieważ warstwa ta podlega stałemu mieszanii przez wzbudzający fale wiatr. **Ciśnienie cząstkowe CO_2 w tej warstwie dąży do równowagi z ciśnieniem cząstkowym CO_2 w atmosferze.** Chociaż w praktyce idealna równowaga nie występuje – w jej osiągnięciu przeszkadzają różne procesy biologiczne, chemiczne i fizyczne – można jednak mówić o bezpośrednim związku pomiędzy tymi ciśnieniami cząstkowymi.

Dwutlenek węgla jest jednocześnie pochłaniany i uwalniany przez ocean. W warunkach stabilnego klimatu i stałej ilości węgla krążącej w przyrodzie, procesy te się równoważą.

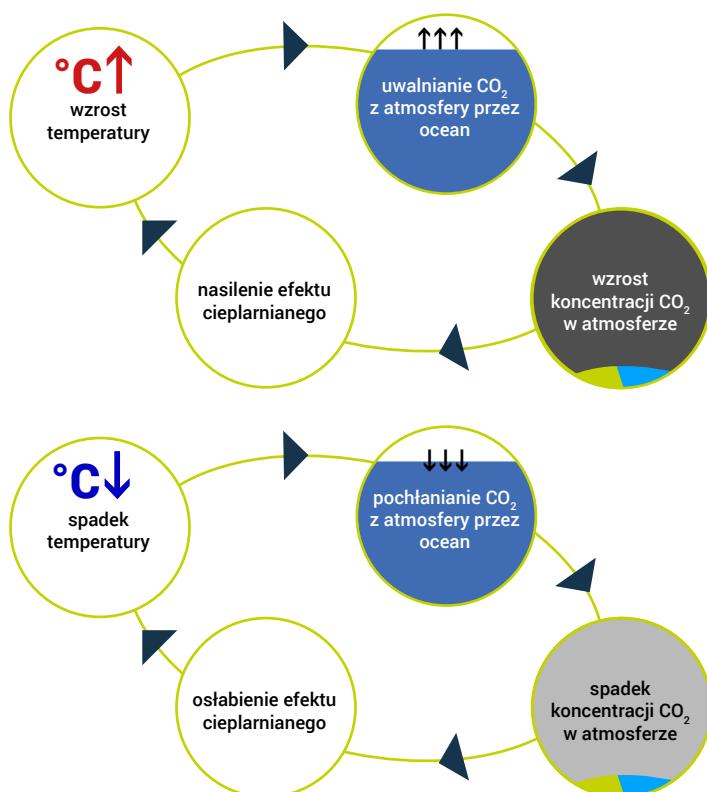
UWAGA!

Rozpuszczalność CO_2 w oceanie zależy od jego temperatury – im cieplej, tym jest mniejsza.

Przy stałym ciśnieniu CO_2 w atmosferze:

- ▶ wzrost temperatury zwiększa uwalnianie się CO_2 z oceanu do atmosfery,
- ▶ spadek temperatury zwiększa rozpuszczanie się atmosferycznego CO_2 w wodach oceanu.

Ten efekt zapewnia dodatnie sprzężenie zwrotne dla zmian średniej temperatury powierzchni Ziemi:



O udziale organizmów żywych w krążeniu węgla w oceanie przeczytasz na przykład w artykule

Globalne ocieplenie, prądy morskie i życie w oceanach »

Ciśnienie cząstkowe (zwane też parcjalnym) to ciśnienie, jakie wywierałby dany składnik mieszaniny gazów (tu: CO_2), gdyby w tej samej temperaturze sam zajmował objętość całej mieszaniny.

CZY WIESZ, ŻE ?

📖 Dzięki uzależnieniu rozpuszczalności CO_2 w wodzie od temperatury ocean bierze udział w transporcie dwutlenku węgla między różnymi szerokościami geograficznymi. Przykładowo, chłodne wody, które u wybrzeży Grenlandii opadają w głąb oceanu, pobierają z atmosfery dwutlenek węgla i zabierają go ze sobą w podróż wzdłuż dna oceanicznego z powrotem w niższe szerokości. Tu wypływają na powierzchnię – w strefie równikowej czy u wybrzeży Ameryki – ogrzewają się i uwalniają CO_2 do atmosfery.

To sprzężenie zwrotne miało zasadnicze znaczenie w kształtowaniu się zapoczątkowywanych przez zmiany nasłonecznienia bieguna północnego epok lodowych i występujących między nimi ociepleń klimatu.



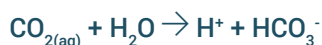
Jeśli interesuje Cię ten temat, zajrzyj do tekstu:

Klimat: przeszłość, teraźniejszość, przyszłość »

Co się dzieje...

Gdy CO₂ trafia do oceanu...

Gdy cząsteczki dwutlenku węgla znajdują się pomiędzy cząsteczkami wody, reagują z nimi, tworząc nietrwałe cząsteczki kwasu węglowego H₂CO₃, niemal natychmiast rozpadające się na jony wodorowe i wodorowęglanowe:



1

Jony wodorowęglanowe utworzone w wyniku tych reakcji albo wietrze-
nia skał mogą też rozpadać się, tworząc jony węglanowe (CO₃²⁻):



2

Te z kolei łączą się z dwutlenkiem węgla i wodą, dając w rezultacie
kolejne jony wodorowęglanowe:



3

Zauważ, że mamy tu kolejne reakcje, w wyniku których z roztworu znikają czą-
steczki CO₂, a pojawiają się jony HCO₃⁻. To oznacza, że w mieszaninie „robi się
miejsce” na przyjęcie kolejnych cząsteczek dwutlenku węgla z atmosfery. Za-
chowanie równowagi ciśnień parcyjnych między atmosferą i oceanem wymaga
więc, by ocean pochłoniął więcej CO₂, niż gdyby te reakcje nie zachodziły.

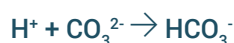
Gdy w atmosferze przybywa CO₂...

Dopóki wzrost średniej temperatury jest umiarkowany (patrz UWAGA
na poprzedniej stronie), dopóty reakcje zachodzące w oceanie mogą
stanowić dobry mechanizm stabilizujący klimat i usuwający z at-
mosfery pojawiającą się w niej z dowolnych przyczyn nadwyżkę CO₂.
Proces ten prowadzi jednak do zakwaszania oceanu – zjawiska, które
może negatywnie odbijać się na morskich ekosystemach, ze względu
na towarzyszący mu spadek koncentracji jonów węglanowych (CO₃²⁻).

ZAKWASZANIE OCEANU – stopniowy wzrost kwasowości oceanu,
czyli wzrost koncentracji jonów wodorowych (H⁺), a właściwie
hydroniowych (H₃O⁺) w wodzie (spadek pH), na przestrzeni długiego
okresu – typowo dziesiątek lat.

DEFINICJA
ZAKWASZANIE OCEANU

Gdy w wodzie rozpuszcza się coraz więcej dwutlenku węgla, reakcje
1 prowadzą do intensywnego uwalniania jonów wodorowych (H⁺).
W takich warunkach rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia reakcji
odwrotnych do **2**, czyli takich, w których jon węglanowy zamieniany
jest na jon wodorowęglanowy:



Jednocześnie jony węglanowe są cały czas zużywane w reakcjach
3. W efekcie ich koncentracja w wodzie oceanicznej spada.

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 W rzeczywistości wolne jony
wodorowe natychmiast łączą się
z cząsteczkami wody, tworząc
jony hydroniowe H₃O⁺.

UWAGA

Wymienione obok reakcje zacho-
dzą w roztworze cały czas i w obie
strony.

To, który kierunek reakcji jest bar-
dziej prawdopodobny (częstszy),
zależy od dostępności składników,
temperatury itd.

Zgodnie z definicją odczyn (pH) wody
oceanicznej nie musi być kwaśny, by
można było mówić o zakwaszaniu się
oceanu. Wystarczy, że obserwujemy
jego spadek.

DLACZEGO NIEDOBÓR JONÓW WĘGLANOWYCH STANOWI PROBLEM?

Jak już wiesz z materiału o wolnym cyklu węglowym, szereg organizmów morskich – takich jak otwornice, mięczaki czy koralowce – pobiera z wody jony wapniowe i węglanowe, by budować z nich swoje muszki lub szkielety. To łatwe, gdy w wodzie znajduje się dużo tych jonów – roztwór jest nimi przesycony, sól łatwo się strąca. Przy stabilnej koncentracji CO_2 w atmosferze jest to sytuacja typowa dla wód na powierzchni oceanu i do takich warunków przystosowały się organizmy morskie. Jeśli jednak stężenie CO_2 w powietrzu szybko rośnie (tak jak ma to miejsce obecnie), w wodzie morskiej zaczyna ubywać jonów węglanowych i budowanie muszki robi się coraz trudniejsze. W skrajnych przypadkach, gdy roztwór węglanu wapnia stanie się nienasycony, może to prowadzić wręcz do rozpuszczania muszki żyjących organizmów.



Rysunek 3: Skorupka umieszczona na 45 dni w wodzie o pH 7,8 (przewidywanym na koniec XXI wieku).

Źródło: NOAA Environmental Visualization Laboratory (za Wikimedia).

Badania geologiczne wskazują, że jeśli wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze zachodzi w długiej skali czasowej (rzędu tysięcy lat i dłuższej), spadku nasycenia wody jonami węglanowymi udaje się uniknąć dzięki rozpuszczaniu osadów morskich i wietrzeniu skał (Hönisch i in., 2012). Niestety współczesny wzrost stężenia tego gazu w powietrzu zachodzi dużo szybciej.



Jeśli chcesz dokładniej zrozumieć te zagadnienia, zajrzyj do artykułu:

Szybki cykl węglowy, część 2: węgiel w oceanach »

Więcej szczegółów także w tekstach:

Mit: Zakwaszanie oceanu nie szkodzi morskim stworzeniom »

Mit: Wzrost emisji CO_2 nie ma wpływu na oceany »

Nasycenie roztworu

Węglan wapnia CaCO_3 to sól, czyli substancja powstała z połączenia jonów o dodatnim (Ca^{2+}) oraz ujemnym (CO_3^{2-}) ładunku elektrycznym. Rozpuszczenie soli w wodzie polega na odizolowaniu tych jonów od siebie przez cząsteczki wody. W roztworze może być rozpuszczona określona ilość substancji. Jeśli będzie jej za dużo, cząsteczek wody przestanie wystarczać do rozdzielania jonów. Jony zaczną się wtedy łączyć, co nazywamy wytrącaniem się soli.

To, ile soli można rozpuścić w wodzie (próg rozpuszczalności), zależy od rodzaju substancji, obecności innych domieszek (występują na przykład różnice pomiędzy wodą słodką i słoną) i temperatury.

Roztwór nienasycony to taki, w którym zawartość soli jest mniejsza od progu rozpuszczalności – jeśli dodamy do niego kolejne porcje soli, zostaną one rozpuszczone.

Roztwór nasycony to taki, w którym jest już rozpuszczona maksymalna (w danych warunkach) dawka soli – jeśli dodamy do niego kolejne porcje soli, będą się one wytrącać w formie stałej.

Roztwór przesycony to taki, w którym zawartość soli jest większa niż ta odpowiadająca stanowi przesylenia – występuje w nim strącanie się soli.

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 Drobne organizmy morskie stanowią podstawę morskich łańcuchów pokarmowych. Spadek ich populacji oznacza brak pożywienia dla większych organizmów i może przyczyniać się do przebudowy całych morskich ekosystemów, a także polegających na nich społecznościach zajmujących się rybołówstwem.

👉 Rify koralowe chronią przed zniszczeniami powodowanymi przez sztormy i falowanie wiele wysp, a także dostarczają składników odżywczych i stanowią miejsce zamieszkania dla wielu organizmów morskich. Ich degradacja powoduje drastyczne zmiany w całych morskich ekosystemach.

Węgiel w ekosystemach lądowych

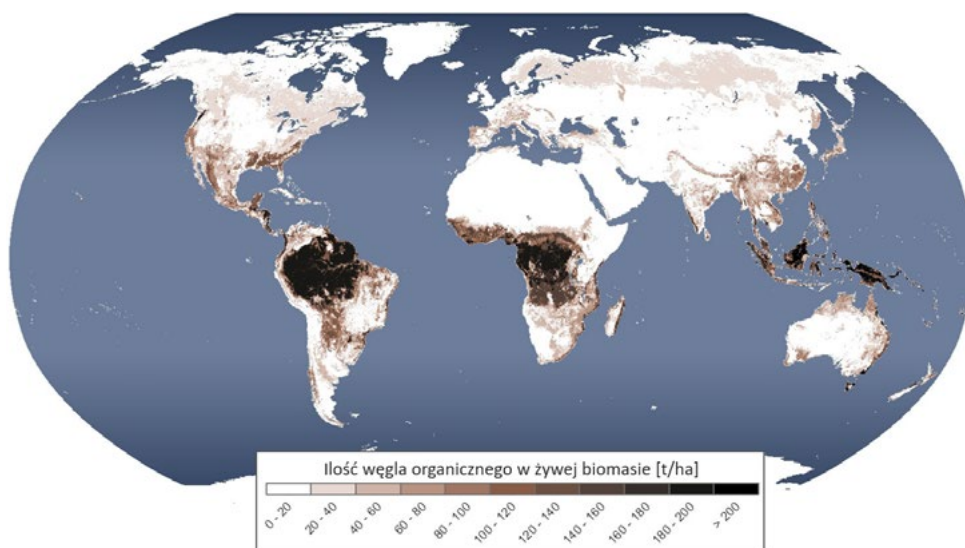
W stabilnym klimacie ilość węgla zgromadzonego w ekosystemach jest w przybliżeniu stała. Zmiany w kondycji ekosystemów wpływają na ilość zgromadzonego w nich węgla i przepływy węgla między rezerwuarami.

Procesy gromadzenia i uwalniania węgla z ekosystemów lądowych (organizmów roślinnych i zwierzęcych oraz gleb) należą przede wszystkim do szybkiego cyklu węglowego. Tylko niewielka część powstających na lądach szczątków organicznych jest odkładana, by w geologicznych skalach czasowych utworzyć pokłady torfu, a potem węgla brunatnego i kamiennego.

WĘGIEL GROMADZI SIĘ W EKOSYSTEMACH

Węgiel krążący w biosferze jest pobierany z atmosfery przez rośliny, a następnie, po połączeniu z innymi pierwiastkami, stanowi budulec ich organizmów oraz istot, które się nimi żywią. Najwięcej węgla zamkniętego w organizmach żywych znajdziemy w rejonie lasów deszczowych, które swoją wyjątkową bujność zawdzięczają łatwemu (i całorocznemu) dostępowi do dużej ilości energii słonecznej oraz wody (spójrz na rysunek poniżej).

Zwiększenie dostępności dwutlenku węgla może ułatwiać roślinom wzrost i przyczyniać się do zwiększania ich masy na świecie. Jest to jednak efekt ograniczony, ponieważ oprócz CO_2 rośliny potrzebują także innych składników odżywczych, wody oraz sprzyjających warunków oświetleniowych i klimatycznych. Ich niedostatek ogranicza możliwości wykorzystania nadmiaru dwutlenku węgla.



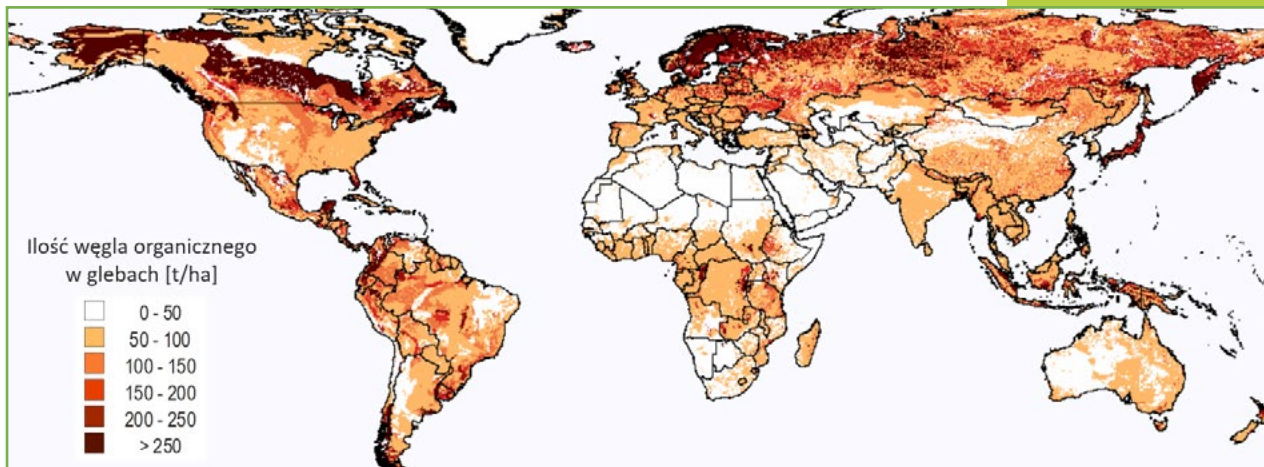
CZY WIESZ, ŻE ?

📌 W latach 2009–2018, ekosystemy lądowe (roślinność i gleby) pochłonęły ok. 29% dwutlenku węgla wyemitowanego w tym czasie wyniku działalności człowieka (Friedlingstein i in., 2019).

Rysunek 4: Ilość węgla organicznego w żywych organizmach, zarówno na, jak i pod powierzchnią ziemi (w tonach na hektar).

Źródło: Reuch i Gibbs i in., 2008.

Obumierająca materia organiczna gromadzi się w glebach i torfowiskach. W warstwie gleb do głębokości 1 metra jest dwukrotnie więcej węgla niż w atmosferze. Dzięki niskiej temperaturze spowalniającej rozkład materii najbogatsze w węgiel są gleby leżące w wysokich szerokościach geograficznych (czyli bliżej biegunów) – możesz to zauważyć na rysunku poniżej. 20% powierzchni lądów pokrywa wieloletnia zmarzlina, w której materia organiczna może zbierać się i pozostawać nienaruszona przez dziesiątki tysięcy lat. Z kolei gleba strefy międzyzwrotnikowej jest uboga w materię organiczną, która szybko ulega tu rozkładowi.



Rysunek 5: Ilość węgla organicznego w glebach do głębokości 1 m (w tonach na hektar).

Źródło: Hiederer i Köchy (2011).

Ekosystemami niezwykle efektywnie magazynującymi węgiel są torfowiska. Powstają one w warunkach dużej wilgotności, gdy lustro wody gruntowej znajduje się blisko powierzchni. Powyżej poziomu wody pojawia się cienka warstwa gleby, w której dzięki dostępowi do tlenu funkcjonują mikroorganizmy rozkładające szczątki roślinne oraz zwierzęce. Część szczątków trafia jednak do znajdującej się niżej, nasączonej wodą warstwy beztlenowej i jest odkładana jako torf. Na przestrzeni tysięcy lat powstają w ten sposób pokłady o wielometrowej miąższości.

W naszej epoce geologicznej (holocenie) torfowiska przeciętnie pochłaniają zaledwie 0,05 GtC/rok, jednak wystarczyło to już do stworzenia rezerwuaru dorównującego, a być może przekraczającego, ilość węgla w atmosferze. Do niedawna podawano, że jest to ok. 600 GtC (Yu i in., 2010), ale ostatnie badania wykazały, że w torfowiskach znajduje się ponad 1000 Gt, czyli 1 Tt (teratona) węgla (Nichols i Peteet in., 2019). Co ciekawe, torfowiska są niezwykle skoncentrowanym magazynem węgla, bowiem zajmują zaledwie 3% powierzchni lądów. W sprzyjających warunkach torf może stopniowo przeobrazić się w węgiel brunatny, a następnie kamienny. To proces, w wyniku którego węgiel (pierwiastek) jest usuwany z szybkiego cyklu węglowego.

WĘGIEL WRACA DO ATMOSFERY

Jak już wiesz, gdy rośliny pobierają dwutlenek węgla z atmosfery, przekształcają go na drodze fotosyntezy w węglowodany. W tym procesie węgiel podwyższa swój „stan energetyczny” – można porównać to do ładowania baterii. Zamknięty w węglowodanach zapas energii może być następnie wykorzystany

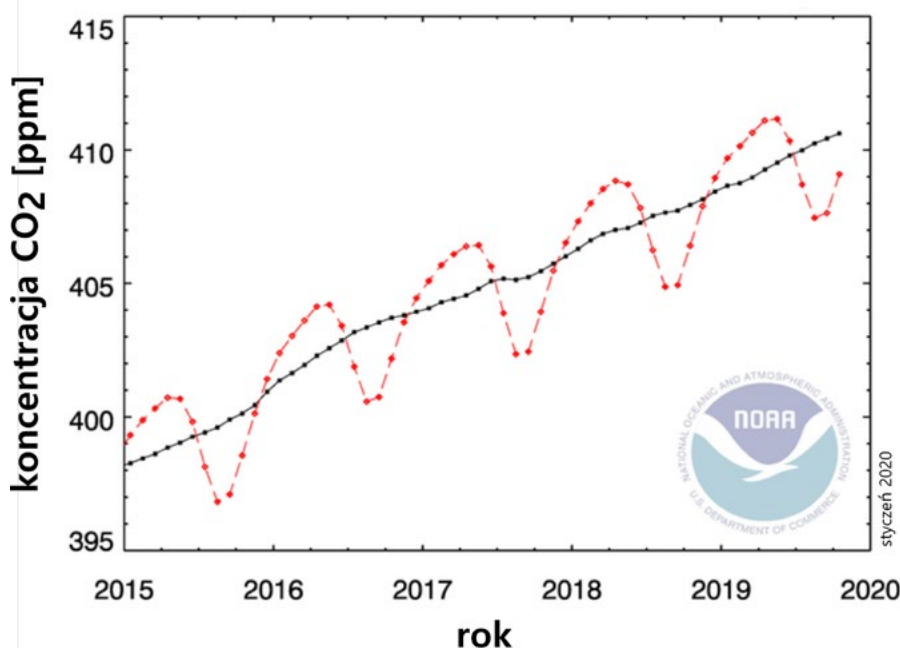
Torf – masa organiczna złożona z niecałkowicie rozłożonych szczątków roślin.

przez samą roślinę lub zwierzę, które ją zje. W procesie **oddychania** cząsteczki organiczne zostają połączone z tlenem, co skutkuje uwolnieniem energii oraz powstaniem dwutlenku węgla. Czasami nazywamy to również „spalaniem”. Gdy organizmy żywe umierają, ich szczątki są **rozkładane** przez grzyby i bakterie, czemu towarzyszą emisje dwutlenku węgla (jeśli rozkład zachodzi w obecności tlenu) lub metanu (jeśli warunki są beztlenowe). Jak łatwo zauważyć, mamy tu do czynienia z zamkniętym cyklem: węgiel jest pobierany z atmosfery, a na końcu znów do niej wraca.

Kolejnym mechanizmem umożliwiającym powrót węgla znajdującego się w roślinach węgiel do atmosfery są **pożary**. Jednak również tu (o ile klimat jest stabilny i nie zachodzą inne zaburzenia) mamy do czynienia z zamkniętym cyklem: odrastanie roślin, w szczególności drzew, oznacza pobieranie z atmosfery dwutlenku węgla wyemitowanego podczas pożaru.

ROCZNY CYKL KONCENTRACJI CO₂ W ATMOSFERZE

Koncentracje dwutlenku węgla w atmosferze zmieniają się w związku z naturalnymi cyklami przyrody. W półroczu ciepłym rozwijające się rośliny intensywnie pobierają CO₂ z atmosfery, zmniejszając jego koncentrację w powietrzu (minimum przypada zwykle na sierpień). Jesienią część roślin umiera, a inne przechodzą w stan zimowego odpoczynku (np. zrzucają liście). Fotosynteza hamuje, a dodatkowo procesy rozkładu uwalniają węgiel z martwej materii organicznej. W rezultacie stężenie dwutlenku węgla w powietrzu rośnie. Globalna średnia koncentracja CO₂ zmienia się zgodnie z rytmem pór roku półkuli północnej, ponieważ powierzchnia lądów i masa roślinności sezonowej jest tu większa niż na półkuli południowej (patrz rysunek poniżej).



Rysunek 6: Koncentracje dwutlenku węgla obserwowane na Mauna Loa na Hawajach. Na czerwono średnie miesięczne, na czarno – wyniki pomiarów po usunięciu rocznych cykli.

Źródło: NOAA



Aktualne dane z pomiarów na Mauna Loa znajdziesz na stronie NOAA »

W warunkach stabilnego klimatu i braku ingerencji w ekosystemy lądowe, ilość węgla zgromadzonego w ekosystemach lądowych jest w przybliżeniu stała: dopływy i straty węgla równoważą się w ciągu roku. Obecnie, w związku z działalnością człowieka, średnia koncentracja CO_2 w powietrzu rośnie, w wynikach pomiarów wciąż jednak wyraźnie widoczny jest cykl roczny.

ZMIANY W EKOSYSTEMACH – ZMIANY W PRZEPŁYWACH WĘGLA

Zmiany w zasięgach, kondycji czy składach gatunkowych ekosystemów łączą się ze zmianami w ilości węgla zmagazynowanego w różnych jego rezerwach (roślinach, glebie, atmosferze itd.) i przepływach między nimi.

PRZYKŁADY

- **Na terenie pozbawionym wcześniej roślin zaczyna rozwijać się las.** Stopniowo, na przestrzeni kilkuset lat, rośnie masa roślinności, a więc i masa zgromadzonego w niej węgla. Jednocześnie (w skali czasowej tysięcy lat) rośnie ilość węgla zmagazynowanego w glebie. W tym czasie pobór dwutlenku węgla z atmosfery jest zwiększony. Dopiero po wielu latach dochodzi do wyrównania ilości węgla pochłanianego i emitowanego przez ten ekosystem.
- Dla pozyskania nowych terenów uprawnych **człowiek likwiduje naturalny las deszczowy**. Oznacza to, że z ekosystemu w bardzo krótkim czasie znika biomasa roślinna:
 - w ciągu godzin i dni, jeśli dżungla zostaje wypalona,
 - w ciągu miesięcy, lat, dekad, jeśli drzewa zostają wycięte i wykorzystane na opał, papier, meble czy materiały budowlane (te produkty zostają spalane lub rozłożone po dłuższym czasie),

Usunięcie drzew i zniszczenie podszycia prowadzi do odsłonięcia gleb i ułatwienia ich erozji, a co za tym idzie – dalszych emisji dwutlenku węgla. Proces ten jest szczególnie intensywny zaraz po wylesieniu, jednak może trwać przez kolejne dziesięciolecia.

- **Na terenie, z którego został usunięty las tropikalny, człowiek zakłada plantację eukaliptusa albo palmy olejowej.** Nowe rośliny, rosnąc, pobierają dwutlenek węgla z atmosfery. Jednak w porównaniu z lasem naturalnym plantacja jest dużo mniej pojemnym magazynem węgla, znajdziemy na niej bowiem mniej gatunków i pięter roślinności. Pochłanianie przez nią CO_2 z atmosfery nie rekompensuje więc utraty węgla wynikającej ze zniszczenia pierwotnego ekosystemu.

Koncentracje gazów śladowych w atmosferze (na przykład dwutlenku węgla) podajemy często w jednostkach:

ppm – parts per million – liczba cząsteczek gazu śladowego w milionie cząsteczek powietrza

ppb – parts per billion – liczba cząsteczek gazu śladowego w miliardzie cząsteczek powietrza

ppt – parts per trillion – liczba cząsteczek gazu śladowego w bilionie cząsteczek powietrza.

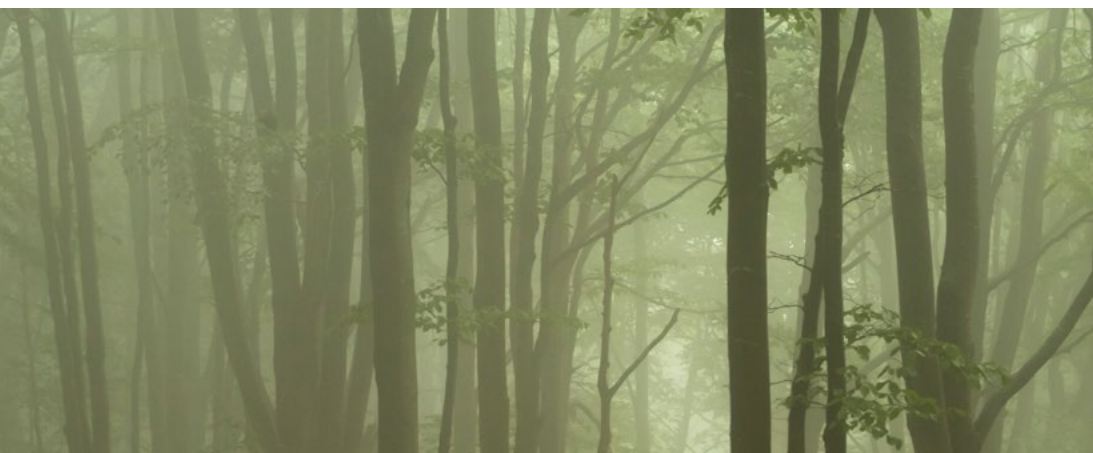


ZOBACZ ANIMACJĘ pokazującą, jak w cyklu rocznym zmienia się zasięg roślinności prowadzącej fotosyntezę oraz koncentracje dwutlenku węgla w różnych częściach świata. »

CZY WIESZ, ŻE ?

✎ Zamiana lasów na grunty rolnicze była do połowy XX wieku głównym źródłem emisji dwutlenku węgla do atmosfery i wciąż odpowiada za około 10% naszych aktualnych emisji.

✎ Osuszanie torfowisk powoduje, że z najefektywniejszych „pochłaniaczy” węgla w biosferze lądowej stają się jednymi z najsilniejszych źródeł jego emisji do atmosfery. Pozbawiony ochronnego działania wody torf szybko rozkłada się w środowisku tlenowym, skutkiem czego zawarty w nim węgiel organiczny przekształca się w dwutlenek węgla. Szacuje się, że osuszone torfowiska emitują około 2 Gt CO_2 rocznie, a więc ilość odpowiadającą 5% pozostałych antropogenicznych emisji.



Impuls węglowy i jego usuwanie z atmosfery

Usunięcie dużej ilości dwutlenku węgla z atmosfery odbywa się przy współdziałaniu ekosystemów lądowych, oceanów i wietrzenia skał. Wymaga tysięcy lat.

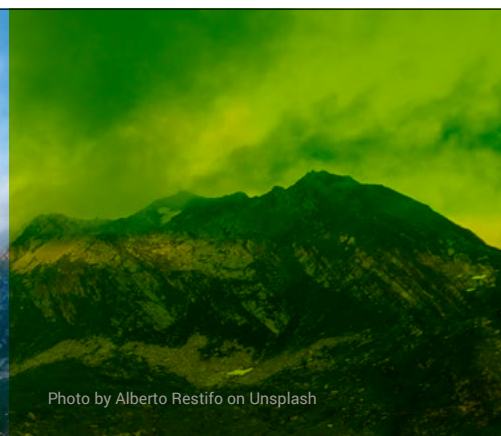
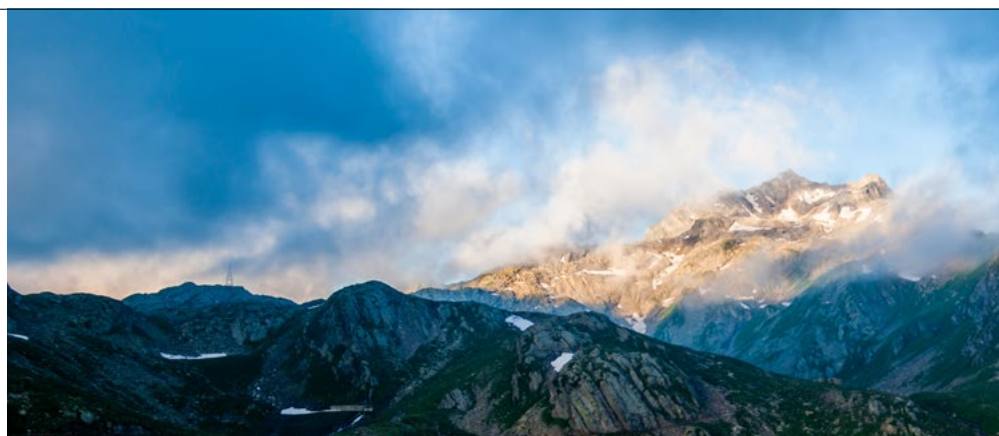


Photo by Alberto Restifo on Unsplash

Jak już wiesz, obieg węgla w przyrodzie obejmuje wiele zachodzących jednocześnie procesów o różnych skalach czasowych. Medium, które łączy wiele z nich, to atmosfera – z niej dwutlenek węgla jest pochłaniany przez roślinność, oceany i w procesie wietrzenia skał. Jeśli wprowadzimy do niej dużą ilość dwutlenku węgla (na przykład tak, jak robimy to teraz – przez spalanie paliw kopalnych, które przez miliony lat spoczywały pod ziemią i nie uczestniczyły w obiegu węgla w przyrodzie), zmiany pojawiają się w przebiegu licznych procesów przyrodniczych.

Wyobraźmy sobie, że do atmosfery trafia nagle bardzo duża ilość dwutlenku węgla – tzw. „impuls węglowy”. W jakim tempie będzie usuwany z atmosfery? Jakie mechanizmy odegrają rolę w jakich skalach czasowych? Jakie inne efekty zaobserwujemy?

W CIĄGU PIERWSZYCH LAT I DEKAD...

Wzrost dostępności dwutlenku węgla w atmosferze powoduje szybszy wzrost roślin (przyrost ich masy), a pochodząca z nich martwa materia organiczna naturalnie zacznie trafiać do gleb.

Jednocześnie dwutlenek węgla rozpuszcza się w powierzchniowych warstwach oceanu, bo jak już wiesz, atmosfera i woda dążą do wyrównania ciśnień cząstkowych CO_2 . Szybkie rozpuszczanie dużych ilości dwutlenku węgla w wodzie może prowadzić do niedoboru jonów węglanowych i rozpuszczania muszelek organizmów budujących je z węglanu wapnia.

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 Od czasu rewolucji przemysłowej koncentracja CO_2 w atmosferze wzrosła już o 47% (WMO i in., 2019).

W CIĄGU PIERWSZYCH STULECI...

Wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze skutkuje wzrostem średniej temperatury powierzchni Ziemi, a więc i przyspieszeniem rozkładu materii organicznej w glebach. Związane z tym emisje równoważą pochłanianie CO_2 przez roślinność, a więc ekosystemy przestają pochłaniać nadwyżkę CO_2 z atmosfery. Szybka zmiana temperatury i wilgotności może wręcz sprawić, że przez jakiś czas ich emisje będą większe niż pochłanianie – do momentu, gdy obumrze cała nieprzystosowana do nowych warunków roślinność. W końcu pochłanianie i emisje CO_2 z ekosystemów lądowych znów się zrównoważą.

W tym samym czasie cyrkulacja oceaniczna przenosi rozpuszczający się w wodach powierzchniowych CO_2 oraz nadwyżkę jonów wodorowęglanowych (HCO_3^-) także do głębszych warstw oceanów. Na powierzchni pojawiać się będzie świeża woda z głębin, zdolna do pochłaniania kolejnych cząsteczek CO_2 . W warstwach powierzchniowych będzie rosła kwasowość, a stężenie jonów węglanowych będzie spadać.

MIJAJĄ TYSIĄCLECIA...

Rezerwuary węgla w ekosystemach lądowych zdążyły się ustabilizować i nie pochłoną już więcej tego pierwiastka. Tymczasem jednak zakwaszona i nasycona CO_2 woda z powierzchni zaczyna docierać w coraz głębsze warstwy oceanu i może rozpuszczać składające się z węglanu wapnia osady denne.

W tej skali czasowej na znaczeniu zyskuje proces wietrzenia skał wapiennych. Znajdujący się w nich CaCO_3 wchodzi w reakcje z nasyconą CO_2 wodą opadową i w postaci jonów wapniowych i wodorowęglanowych spływa do oceanu. Bytujące tu organizmy wykorzystują te składniki do budowy pancerzyków z węglanu wapnia, a po swojej śmierci wraz z nimi opadają na dno, tworząc kolejne warstwy osadów.

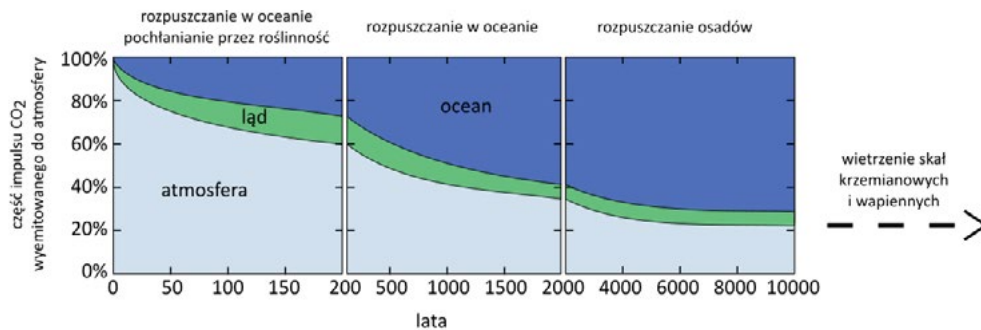
W stabilnych warunkach procesy dostarczające do oceanów węglan wapnia są równoważone przez procesy odkładania go w osadach oceanicznych. Jednak kiedy wzrost koncentracji CO_2 jest szybki, zakwaszaniu wody towarzyszy niedobór jonów węglanowych, który spowalnia powstawanie osadów albo wręcz powoduje ich rozpuszczanie. W efekcie koncentracja węglanu wapnia w oceanie zaczyna rosnąć. Rozpuszczony w wodzie CaCO_3 jest przeciwdziałającą zakwaszaniu zasadą, umożliwia więc absorpcję dodatkowej porcji CO_2 , obniżając tym samym jego stężenie w powietrzu.

MIJAJĄ DZIESIĄTKI TYSIĘCY LAT...

Tempo odkładania węglanu wapnia w postaci osadów zrównuje się wreszcie z tempem dostarczania go do oceanów i ustala się nowa równowaga (przy podwyższonej koncentracji CaCO_3 w wodzie i CO_2 w powietrzu).

MIJAJĄ SETKI TYSIĘCY LAT...

Zauważamy efekt działania termostatu węglowego, czyli nasilenia wietrzenia skał w wyniku wzrostu średniej temperatury. Ten powolny proces pozwala na usunięcie reszty nadwyżki CO_2 z atmosfery. Jednocześnie krążenie wody i organizmów morskich w oceanie pozwala na rozprowadzenie po nim węglanu wapnia i zniesienie zakwaszenia.



Rysunek 7: Schematycznie przedstawiony proces usuwania z atmosfery impulsu węglowego – nagle wprowadzonej do niej dużej ilości dwutlenku węgla (rzędu tysięcy gigaton węgla). Kolorowe pola odpowiadają kolejnym rezerwuárom węgla: atmosferze, ekosystemom lądowym, oceanowi. Dwutlenek węgla wprowadzony do atmosfery natychmiast zaczyna być pobierany przez roślinność i oceany, ale proces ten jest długotrwały. Po 200 latach ok. 60% początkowo wyemitowanego CO_2 wciąż jeszcze znajduje się w atmosferze. W tym czasie kończą się możliwości przyrostu masy roślin – zauważ, że ten rezerwuuar przestaje zwiększać swój rozmiar, a wręcz może go zmniejszać. Po 2000 lat w atmosferze pozostaje jeszcze nawet 40% wprowadzonego do niej węgla. Dopiero po upływie setek tysięcy lat, dzięki wietrzeniu skał, powolnym procesom zachodzącym w oceanach, ilość dwutlenku węgla w atmosferze ma szansę na powrót do stanu sprzed impulsu węglowego.

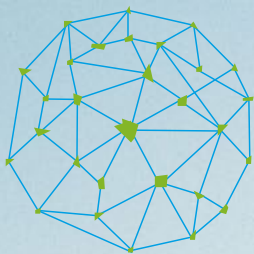
Na podstawie: Ciais i in., 2013.

Fakt, że wycofanie z atmosfery dużego impulsu węglowego wymaga dużo czasu, ułatwia nam badanie przeszłości klimatu. Nawet jeśli pochodzące z próbek geologicznych dane mają małą rozdzielczość (tzn. dają nam informacje o stu- czy tysiącletnich średnich temperaturach lub składzie atmosfery) i moglibyśmy przeoczyć nagły wzrost koncentracji CO_2 trwający np. 50 lat, to nie przegapilibyśmy długiego okresu pozbywania się nadwyżki dwutlenku węgla przez atmosferę.

CZY WIESZ, ŻE ?

LICZY SIĘ SUMA EMISJI!

Jak widzisz, wycofanie z atmosfery i w ogóle szybkiego cyklu węglowego dużej ilości węgla wymaga nawet setek tysięcy lat. Gdy operujemy tak długimi skalami czasowymi, to, czy 2400 GtC uwalnialiśmy do atmosfery w ciągu 250 czy kilku lat, nie ma wielkiego znaczenia – czas pozostawiania nadwyżki CO_2 w atmosferze będzie i tak dużo dłuższy. Dla ostatecznego zasięgu zmiany klimatu liczy się więc przede wszystkim to, ile CO_2 wyemitujemy łącznie.



KLIMATYCZNE ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ

Skąd się biorą antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych?

Wraz z rozwojem współczesnej cywilizacji – rozbudową przemysłu, intensyfikacją rolnictwa, wzrostem populacji i jej dobrobytu – człowiek zaczął emitować do atmosfery coraz większe ilości gazów cieplarnianych, przede wszystkim dwutlenku węgla.

Roczne antropogeniczne (czyli związane z naszą działalnością) emisje gazów cieplarnianych mogą wydawać się niewielkie. Przykładowo, obecnie w ciągu roku wprowadzamy do atmosfery ok. 20 razy mniej CO_2 niż źródła naturalne (Ciais i in., 2013). Jednak w przeciwieństwie do emisji z ekosystemów lądowych, oceanów czy wulkanów, nasze nie są równoważone żadnymi procesami, w których usuwalibyśmy gazy cieplarniane z powietrza. Procesy naturalne robią to za nas tylko częściowo. W efekcie z roku na rok koncentracja gazów cieplarnianych w atmosferze rośnie.

Dwutlenek węgla, metan i tlenek azotu(I) dołączają do naturalnych cykli obiegu węgla i azotu w przyrodzie, powodując zaburzenia w różnych ich elementach (na przykład wspomniane w trzeciej lekcji zakwaszanie oceanu). Freony i inne syntetyzowane przez człowieka gazy techniczne stanowią zupełnie nowe składniki atmosfery.

Z tej lekcji dowiesz się, jakie procesy związane z działalnością ludzką prowadzą do emisji poszczególnych gazów cieplarnianych. Najwięcej uwagi poświęcimy dwutlenkowi węgla, który w największym stopniu odpowiada za współcześnie obserwowaną zmianę klimatu. Przyjrzymy się również emisjom związanym z poszczególnymi dziedzinami działalności człowieka (np. energetyką, rolnictwem, transportem).

Antropogeniczne emisje dwutlenku węgla

Człowiek przyczynia się do emisji dwutlenku węgla do atmosfery przede wszystkim poprzez spalanie paliw kopalnych – procesu, w wyniku którego do szybkiego cyklu węglowego trafia węgiel wycofany z niego miliony lat temu. Drugim ważnym źródłem CO₂ są zmiany użytkowania terenu.

ŚWIAT PALIW KOPALNYCH

Rozwój współczesnej cywilizacji wymagał coraz większego zużycia energii do napędzania maszyn przemysłowych i rolniczych, pojazdów, urządzeń domowych i wielu innych. Zaspokojenie tych potrzeb możliwe było dzięki masowemu wykorzystaniu paliw kopalnych – najpierw przede wszystkim węgla brunatnego i kamiennego, następnie także ropy naftowej i gazu ziemnego.

PALIWA KOPALNE to wydobywane z głębi ziemi surowce zawierające węgiel, które w wyniku spalania (łączenia atomów węgla z atomami tlenu) uwalniają energię. Efektem tej reakcji jest też łączenie węgla z tlenem. Do paliw kopalnych zaliczamy węgiel brunatny i kamienny, ropę naftową i gaz ziemny (składający się głównie z metanu).

Podczas spalania paliw kopalnych (reakcji polegającej na łączeniu atomów węgla z tlenem) uwalniane są duże ilości energii. Jednocześnie paliwa są stosunkowo łatwe w przechowywaniu i transporcie – wystarczą odpowiednie pomieszczenia, zbiorniki, a w przypadku ropy i gazu – rurociągi. Można więc przewieźć je do miejsca, w którym chcielibyśmy produkować energię, a samą energię wyprodukować wtedy, gdy jest nam potrzebna. Tych zalet nie posiadały stosowane wcześniej, tradycyjne źródła energii, takie jak wiatr czy rzeki.

Niestety, wykorzystanie paliw kopalnych do produkcji energii nieuchronnie łączy się z uwalnianiem do atmosfery dwutlenku węgla, ważnego gazu cieplarnianego (to efekt reakcji spalania), oraz innych zanieczyszczeń. Oznacza to ponowne wprowadzanie w obieg węgla, który został z niego wycofany wiele milionów lat temu. Jak wiesz z jednej z poprzednich lekcji, jego usunięcie z atmosfery przez procesy naturalne będzie wymagało tysięcy lat.



TERMINOLOGIA

Zgodnie z aktualną nomenklaturą chemiczną cząsteczkę CO₂ nazwalibyśmy ditlenkiem węgla lub tlenkiem węgla(IV). Ponieważ jednak jest to bardzo popularny związek chemiczny, funkcjonujący na co dzień pod nazwą „dwutlenek węgla”, również w naszym kursie pozostajemy przy tym określeniu.

DEFINICJA PALIWA KOPALNE

CZY WIESZ, ŻE ?

Spalając tonę węgla pierwiastkowego, uzyskasz ok. 3,67 tony dwutlenku węgla. Każdy atom węgla (o masie 12u) trzeba połączyć z dwoma atomami tlenu (o masie 16u każdy) – w rezultacie powstaje cząsteczka o masie 44u, czyli ok. 3,67 razy cięższa niż atom węgla.

Masę atomów czy cząsteczek można podawać w jednostkach masy atomowej (symbol „u”, od angielskiego „unit”, czyli „jednostka”). 1u to w przybliżeniu masa atomu wodoru, czyli atomu, który ma w jądrze tylko jeden proton.

Jak obliczyć masę cząsteczki? Wystarczy zsumować masy tworzących ją atomów, na przykład:

$$\text{masa CO}_2 = 12u + 2 \cdot 16u = 44u$$

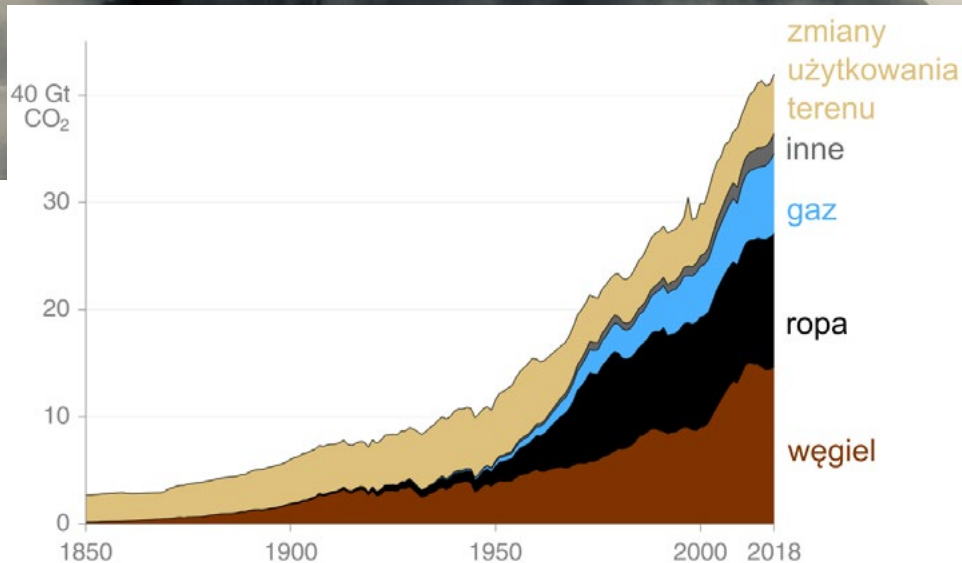
masa
atomu węgla

masa
atomu tlenu

Zwiększanie koncentracji gazów cieplarnianych skutkuje wzrostem średniej temperatury powierzchni Ziemi, zjawiskiem przynoszącym wiele negatywnych skutków dla przyrody i ludzkości. Mimo to, od czasu rewolucji przemysłowej, zużycie paliw kopalnych oraz związane z nim emisje gazów cieplarnianych niemal stale rosły (czemu tak się dzieło, wyjaśnimy dokładniej w kolejnej lekcji). Obecnie spalanie węgla, ropy i gazu odpowiada za ponad 80% całkowitych emisji dwutlenku węgla związanych z działalnością człowieka (Friedlingstein i in., 2019).

REWOLUCJA PRZEMYSŁOWA – ogół zmian ekonomicznych i technicznych, które wiązały się z przejściem od produkowania dóbr w warsztatach czy manufakturach do produkcji fabrycznej, coraz bardziej masowej i zautomatyzowanej. Rozgrywała się od połowy osiemnastego do połowy dziewiętnastego wieku.

DEFINICJA
REWOLUCJA
PRZEMYSŁOWA



Rysunek 1: Roczne emisje dwutlenku węgla (w gigatonach CO₂) w wyniku spalania węgla, ropy i gazu, a także zmian użytkowania terenu oraz z innych źródeł (głównie produkcji cementu).

Źródło: Global Carbon Project i in., (2019).

W roku 2018 całkowite emisje dwutlenku węgla związane ze spalaniem paliw kopalnych wyniosły ok. 34,4±2 GtCO₂ (14,6 GtCO₂ z węgla, 12,4 GtCO₂ z ropy, 7,3 GtCO₂ z gazu), w 2019 prawdopodobnie 34,7±2 GtCO₂ (14,5 GtCO₂ z węgla, 12,5 GtCO₂ z ropy, 7,7 GtCO₂ z gazu. (Friedlingstein i in., 2019).

Aktualne dane na temat emisji związanych z wykorzystaniem paliw kopalnych i produkcją cementu w różnych krajach i regionach świata znajdziesz:

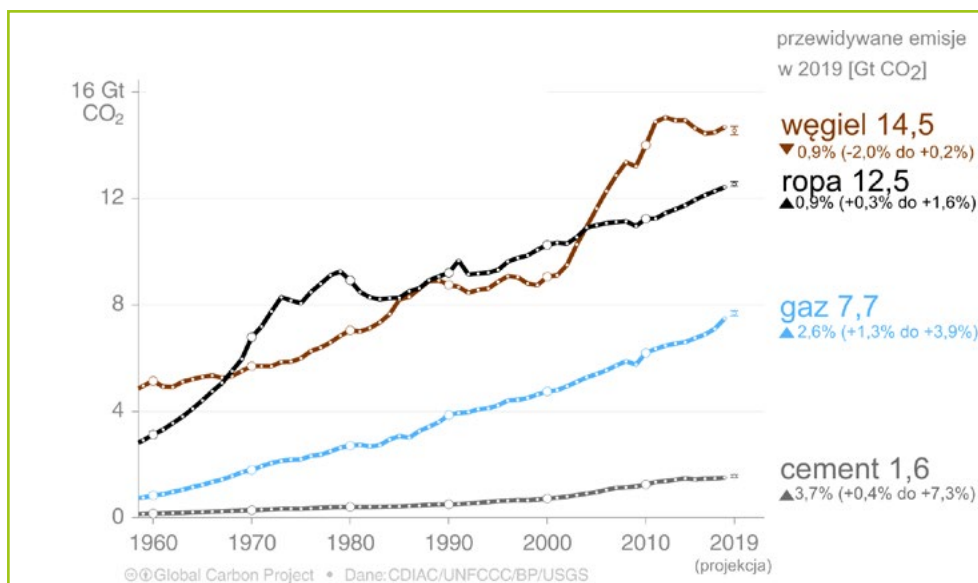
Global Carbon Atlas »
(zajrzyj do wskazówek użytkownika »)
oraz cyklicznych podsumowaniach na stronie Global Carbon Project »

UWAGA!

W poszczególnych paliwach (węglu, ropie, gazie) węgiel pierwiastkowy ukryty jest w cząsteczkach różnych związków chemicznych (o różnych zestawach przetrzymujących energię wiązań). Dlatego wyprodukowanie tej samej ilości energii z ich użyciem skutkuje różnymi emisjami dwutlenku węgla.

Tabela: Typowe zakresy emisji dwutlenku węgla przy produkcji energii z użyciem różnych typów paliw kopalnych, na podstawie: Engineering ToolBox (2009).

Rodzaj paliwa	Masa CO ₂ emitowana przy uwolnieniu gigadżula energii [kgCO ₂ /GJ]
Paliwa gazowe (gaz ziemny i oparte na nim produkty)	50–62
Paliwa na bazie ropy naftowej (ropa, nafta, benzyna...)	69–75
Węgiel (różne klasy)	79–110



UWAGA!

Wraz z emisjami pochodzącymi ze spalania paliw kopalnych prezentuje się często także te pochodzące z produkcji cementu. Wymaga ona wyprężania skał wapiennych zawierających węglan wapnia (CaCO₃) w wysokiej temperaturze, w celu wytworzenia tak zwanego wapna palnego (CaO). W wyniku tej reakcji ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) emitowany jest dwutlenek węgla.

Chociaż jest to inny proces (reakcja chemiczna) niż spalanie paliw kopalnych, również w tym przypadku mamy do czynienia z wprowadzaniem do szybkiego cyklu węglowego węgla, który został z niego wycofany dawno temu (podczas powstawania skał wapiennych z osadów morskich). Dodatkowo, odpowiednią do wyprężania skał temperaturę uzyskuje się najczęściej, spalając węgiel kamienny.

CZY WIESZ, ŻE ?

Nawet paliwa należące do tego samego rodzaju (np. gazowe) mogą mieć różną zawartość węgla pierwiastkowego i innych domieszek (np. wody, siarki). Różnice związane są z pochodzeniem surowca (poszczególne złoża powstawały w różnych warunkach) i jego obróbką (paliwa są w różnym stopniu oczyszczane, ich składniki rozdzielane itp.).

Rysunek 2: Roczne emisje dwutlenku węgla (w gigatonach CO₂) w wyniku spalania węgla, ropy i gazu oraz produkcji cementu. Po prawej zaznaczono przewidywane poziomy emisji z poszczególnych źródeł w 2019 oraz informacje o ich zmianie względem poprzedniego roku (procentowy wzrost lub spadek). Ilustracja pochodzi z raportu opublikowanego pod koniec 2019, kiedy ostateczne dane dla 2019 nie były jeszcze znane.

Źródło: Global Carbon Project (2019).

CZY WIESZ, ŻE ?

Gdy spalamy paliwa, oprócz dwutlenku węgla może powstawać i być wypuszczana do powietrza także sadza – drobne cząstki stałe składające się z węgla pierwiastkowego oraz różnych zawierających węgiel związków i resztek spalonego materiału. Te cząstki pochłaniają promieniowanie słoneczne i mogą przyczyniać się do ogrzewania atmosfery (gdy unoszą się w powietrzu) czy szybszego topnienia lodu i śniegu (gdy opadną na ich powierzchnię). Sumaryczny wpływ sadzy na klimat jest dużo mniejszy niż dwutlenku węgla. Tak jak inne zanieczyszczenia pyłowe, sadza stosunkowo szybko (w ciągu kilku dni lub tygodni) wypada z atmosfery pod wpływem grawitacji.



2019: Globalna emisja dwutlenku węgla wciąż rośnie »

ZMIANY UŻYTKOWANIA TERENU

Z lekcji dotyczącej obiegu węgla w przyrodzie wiesz już, że posunięcia takie, jak wycięcie lasu, wykarczowanie zarośli, wysuszenie bagna (zbiorczo nazywane zmianami użytkowania terenu), skutkują emisjami dwutlenku węgla do atmosfery. Emisje związane są:

- **z likwidacją rezerwuaru węgla, jaki stanowią żyjące rośliny,** które mogą:
 - zostać od razu lub prawie od razu spalone,
 - zostać przetworzone na produkty – meble, włókna, papier itd., które ostatecznie również w ciągu kilku lub kilkunastu, najdalej kilkudziesięciu lat zostaną spalone lub wyrzucone (i ulec rozkładowi),
 - ulec rozkładowi przez mikroorganizmy,
- **z odsłonięciem gleby i wystawieniem na działanie powietrza i wiatru,** co sprzyja jej erozji i utlenianiu zgromadzonych w niej szczątków organicznych,
- **w przypadku wysuszenia terenu podmokłego** – z wystawieniem na warunki tlenowe warstwy torfu, która dotąd była zalana wodą, co umożliwia działanie bakterii tlenowych, rozkładających szczątki organiczne i emitujących CO₂.

W efekcie tych procesów węgiel powróci do atmosfery, przede wszystkim w postaci dwutlenku węgla.

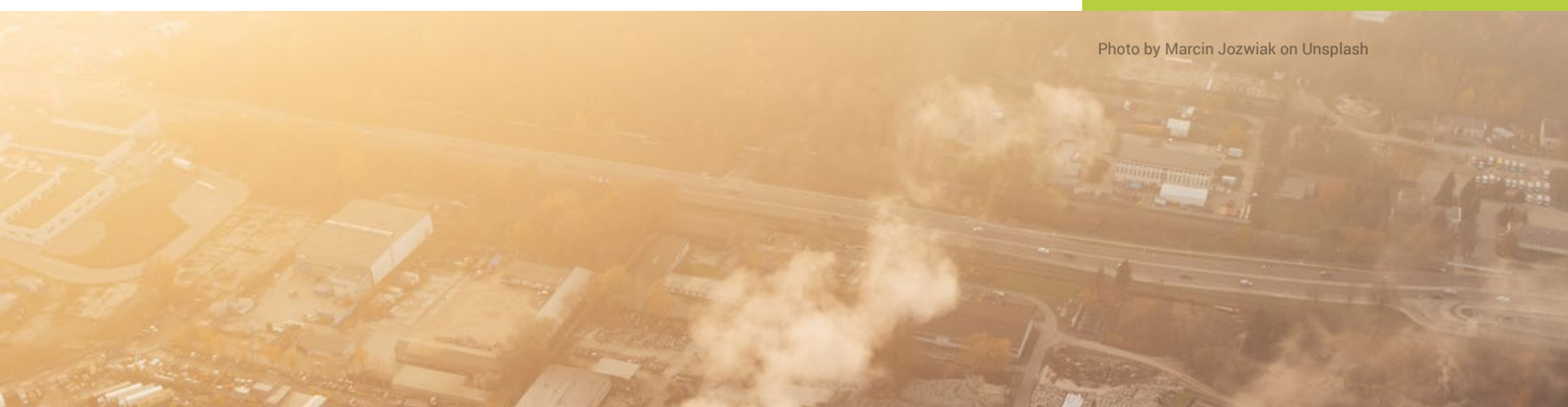
Wylesianie itp. oznacza wprowadzanie do atmosfery węgla, który został z niej usunięty w ciągu ostatnich kilkudziesięciu – kilkuset lat. W przypadku osuszania mokradeł, utlenieniu mogą ulec szczątki organiczne odkładające się w ciągu tysięcy lat.

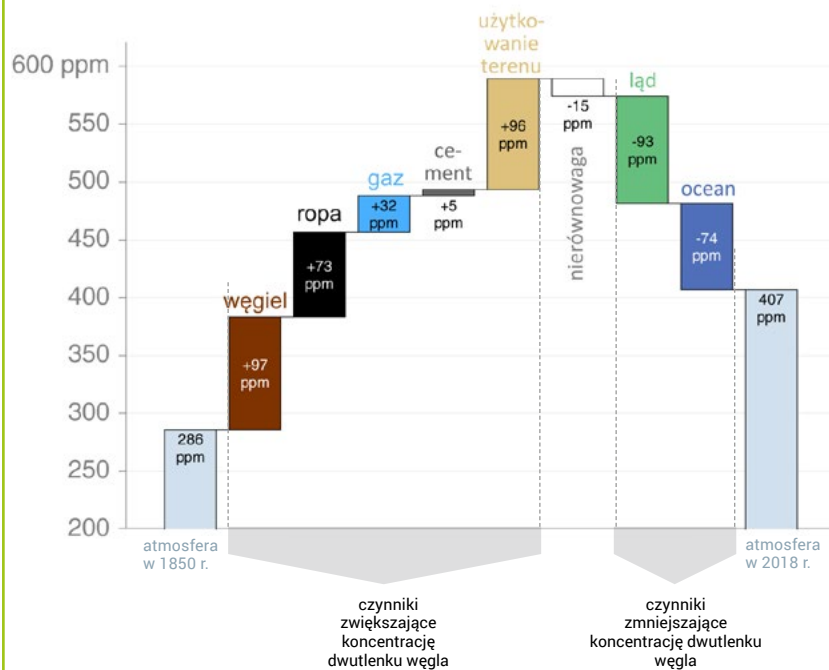
Jak możesz zobaczyć na rysunku 1, emisje dwutlenku węgla związane ze zmianami użytkowania terenu od połowy dziewiętnastego wieku utrzymują się na poziomie kilku gigaton CO₂ rocznie.

CO SIĘ DZIEJE ZWYEMITOWANYM PRZEZ NAS CO₂?

Przed rozpoczęciem epoki przemysłowej koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze przez setki tysięcy lat utrzymywała się na poziomie poniżej 300 ppm. W latach 1850–2019 człowiek wyemitował do atmosfery w sumie 1649 GtCO₂ na drodze spalania paliw kopalnych i produkcji cementu oraz 751 GtCO₂ przez zmiany użytkowania terenu. Te w sumie 2400±238 gigaton dwutlenku węgla dołączyło do szybkiego cyklu węglowego: 586±73 GtCO₂ trafiło do oceanu, 733±147 GtCO₂ zostało pochłonięte przez ekosystemu lądowe, a w atmosferze pozostało 953±18 GtCO₂ (Friedlingstein i in., 2019).

Photo by Marcin Jozwiak on Unsplash

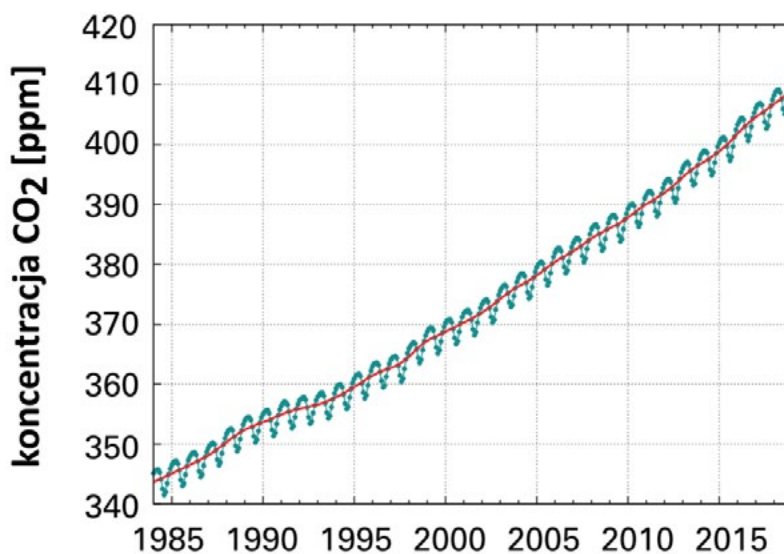




Rysunek 3: Diagram pokazujący, jak poszczególne źródła dwutlenku węgla związane z działalnością człowieka dołożyły się do koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze oraz jak obniżyło ją pochłanianie dwutlenku węgla przez ekosystemy lądowe i ocean.

Źródło: Global Carbon Project (2019).

Od czasu rewolucji przemysłowej koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze stale rośnie, od roku 1750 wzrosła już o 47%. W roku 2018 wyniosła $407,8 \pm 0,1$ ppm (World Meteorological Organization, 2019). Jak możesz zobaczyć na wykresie poniżej, tempo wzrostu koncentracji CO₂ przekracza obecnie 2 ppm/rok.



Rysunek 4: Zmiany koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze (w cząstkach na milion). Niebieskie kropki odpowiadają średnim miesięcznym, czerwona linia pokazuje średnie miesięczne po usunięciu wahań związanych ze zmianami pór roku.

Źródło: World Meteorological Organization (2019).

Antropogeniczne emisje innych gazów cieplarnianych

Chociaż emisje i koncentracje gazów cieplarnianych innych niż dwutlenek węgla są dużo niższe niż CO_2 , również one mają znaczenie dla klimatu. Im mniejsze stężenie konkretnego składnika atmosfery, tym łatwiej je istotnie zmienić.

Dwutlenek węgla nie jest jedynym gazem cieplarnianym, który jest wprowadzany do atmosfery w związku z działalnością człowieka. Ważną rolę odgrywają również metan, tlenek azotu(I), freony i inne gazy techniczne. Ich koncentracja w atmosferze jest dużo mniejsza niż koncentracja dwutlenku węgla i w dużo mniejszym stopniu odpowiadają one za obserwowane obecnie ocieplanie się klimatu. Ten stan rzeczy może jednak łatwo ulec zmianie, dlatego bacznie przyglądamy się emisjom tych substancji, zwłaszcza jeśli stanowią one zupełnie nowe, wytworzone przez człowieka składniki atmosfery.

UWAGA!

Cząsteczka konkretnego gazu cieplarnianego może pochłoniąć tylko promieniowanie o określonych długościach fal. Każdy gaz ma inny zestaw pochłanianych fal, chociaż niektóre częściowo się pokrywają (na przykład tlenku azotu(I) i metanu).

Gazy cieplarniane, które mają duże koncentracje w atmosferze (CO_2 , H_2O), pochłaniają już dużą część „dostępnego” dla siebie promieniowania. Dodawanie ich do atmosfery wciąż nasila efekt cieplarniany, jednak w mniejszym stopniu niż dodanie takiej samej liczby cząsteczek gazu pochłaniającego inne długości fali i mającego mniejsze stężenie w powietrzu – na przykład metanu lub freonów.

METAN

Temat metanu przewijał się już w naszym kursie. To gaz, którego cząsteczki składają się z jednego atomu węgla i czterech atomów wodoru (ma wzór chemiczny CH_4 i masę cząsteczki 16u). Jego „czas życia” w powietrzu jest dużo krótszy niż CO_2 : w ciągu ok. 10 lat wypuszczone do atmosfery cząsteczki metanu utleniają się, w wyniku czego powstaje dwutlenek węgla, który następnie uczestniczy w procesach cyklu węglowego znanych Ci z lekcji trzeciej. Średnia koncentracja metanu wyniosła w roku 2018 1869 ± 2 ppb, czyli o 159% więcej niż przed rewolucją przemysłową (World Meteorological Organization, 2019). Jak widzisz,

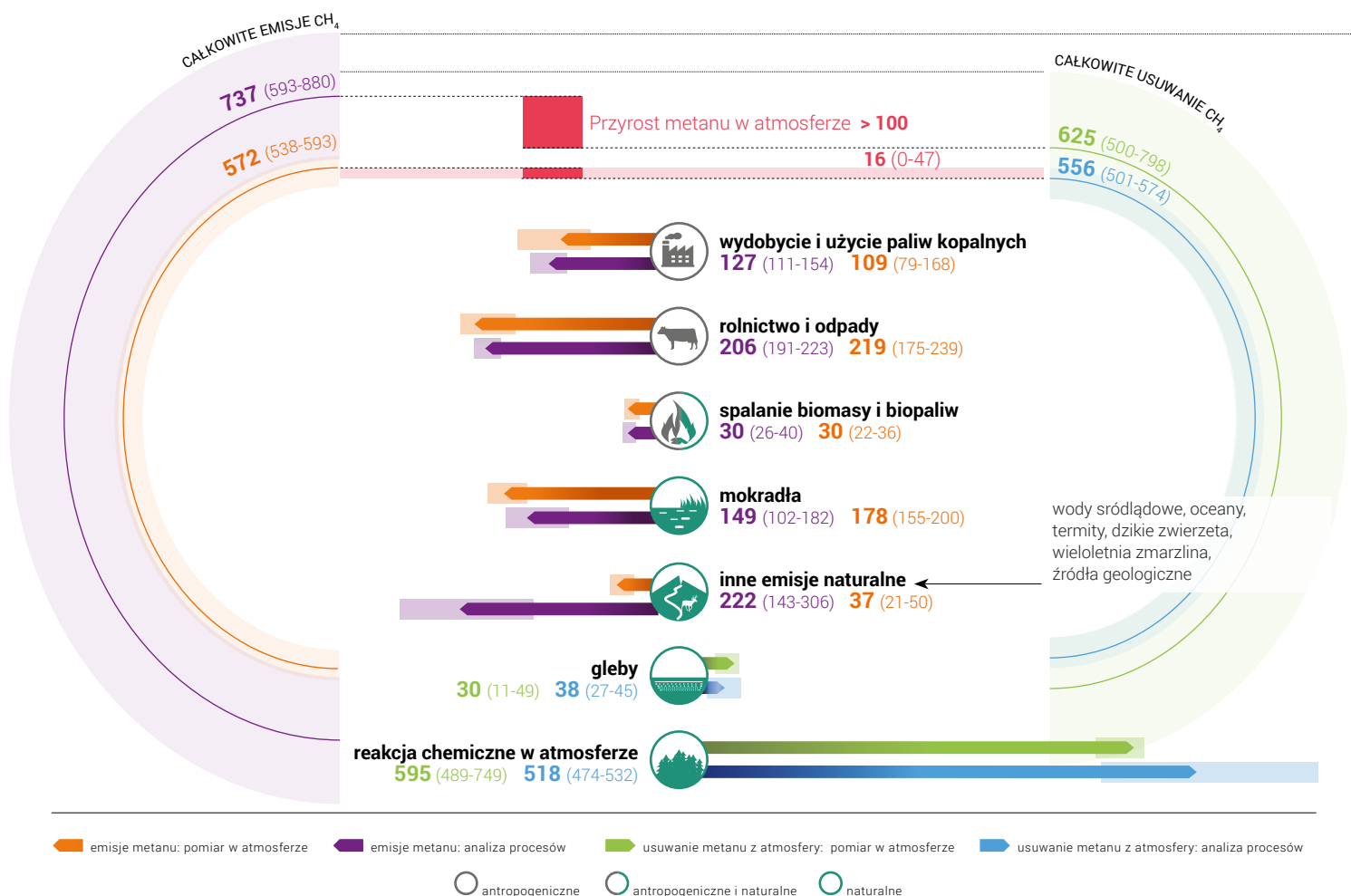
Pamiętaj, że w języku polskim i angielskim posługujemy się różnym nazewnictwem dużych liczb.

	NOTACJA NAUKOWA	 PO POLSKU	 PO ANGIELSKU
1 000 000	10^6	milion	million
1 000 000 000	10^9	miliard	billion
1 000 000 000 000	10^{12}	bilion	trillion

stężenie metanu w powietrzu jest ponad 200 razy mniejsze niż stężenie dwutlenku węgla, a tona CH_4 to 2,75 razy więcej cząsteczek niż tona CO_2 . Uwolnienie tony metanu będzie więc miało większy wpływ na bilans energetyczny Ziemi niż tony dwutlenku węgla (nawet biorąc pod uwagę krótszy czas życia).

Najogólniej rzecz biorąc, metan wprowadzany do atmosfery w wyniku działalności człowieka może pochodzić:

- **ze źródeł geologicznych** (gaz uwalnia się podczas wydobywania wszystkich paliw kopalnych, może także wyciekać z instalacji służących do przetwarzania i transportu gazu ziemnego),
- **ze spalania biomasy** (metan powstaje w wyniku niecałkowitego spalania materii organicznej, zarówno roślinności w czasie pożarów, jak i używanych przez człowieka biopaliw, np. drewna),
- **ze źródeł mikrobiologicznych**, czyli takich, w których dochodzi do beztlenowego rozkładu materii organicznej przez mikroorganizmy (mogą to być składowiska odpadów, sztuczne czy regulowane zbiorniki wodne, zbiorniki nieczystości, pola ryżowe, przewody pokarmowe zwierząt hodowlanych).



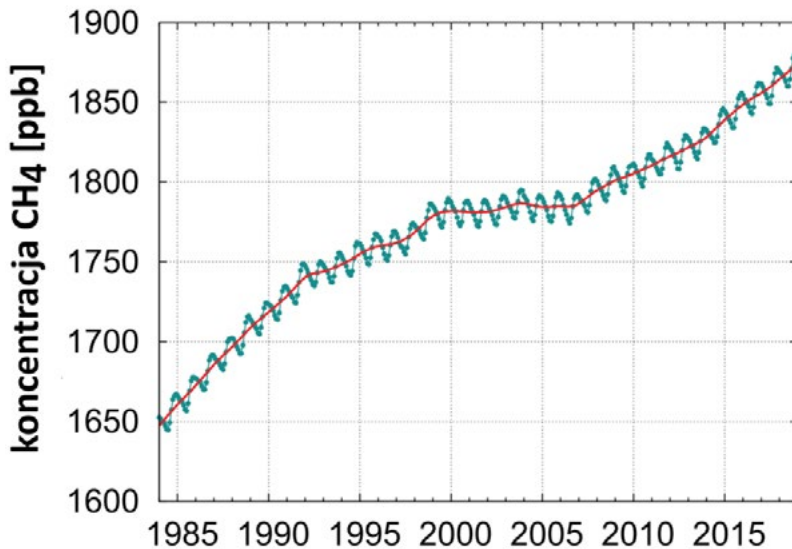
Rysunek 5: Globalny bilans emisji i usuwania metanu z atmosfery w latach 2008–2017.

Bilans obliczany jest dwoma metodami:

- na podstawie pomiarów atmosferycznych,
- na podstawie analizy informacji o procesach, w wyniku których emitowany jest metan (np. pomiarów w miejscach emisji, statystyk gospodarczych).

W przypadku emisji ze źródeł naturalnych wyniki uzyskane tą drugą metodą są prawdopodobnie zawyżone, w przypadku emisji antropogenicznych wyniki są zbliżone.

Dane: Sanuois i in., (2019)



Rysunek 6: Zmiany koncentracji metanu w atmosferze (w cząstkach na miliard). Niebieskie kropki odpowiadają średnim miesięcznym, czerwona linia pokazuje średnie miesięczne po usunięciu wahań związanych ze zmianami pór roku.

Źródło: World Meteorological Organization (2019).

Jak możesz zobaczyć na wykresie powyżej, w latach dziewięćdziesiątych XX wieku wzrost stężenia tego gazu w atmosferze spowolnił, a na początku XXI wieku praktycznie się zatrzymał. Od roku 2007 mamy jednak ponownie do czynienia ze wzrostem jego koncentracji, co jest prawdopodobnie skutkiem zarówno emisji antropogenicznych, jak i zwiększonych emisji z tropikalnych mokradeł (podlegających bezpośredniej presji ze strony człowieka oraz zmiany klimatu) (World Meteorological Organization, 2019).

Stężenie metanu podlega sezonowym wahaniom, podobnie jak ma to miejsce w przypadku dwutlenku węgla. W półroczu chłodnym, gdy duża część roślinności obumiera, wzrasta intensywność procesów rozkładu, które są naturalnym źródłem emisji metanu.

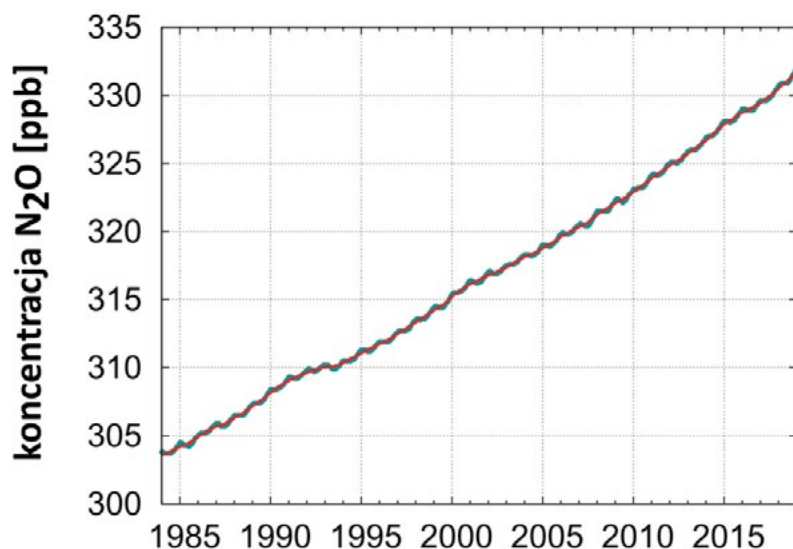
TLENEK AZOTU(I)

Tak jak dwutlenek węgla i metan, tlenek azotu(I) jest gazem naturalnie występującym w ziemskiej atmosferze. Jego cząsteczki składają się z dwóch atomów azotu i jednego atomu tlenu (wzór N_2O , masa cząsteczki $44u$). Powstaje w wyniku aktywności występujących powszechnie w glebie i oceanie bakterii przetwarzających związki azotu. To element obiegu azotu w przyrodzie – zestawu procesów, które w warunkach niezaburzonych równoważą się i pozwalają na utrzymanie stałego składu atmosfery.

Okolo 40% światowych emisji N_2O jest związanych z działalnością człowieka (Ciais i in., 2013), przede wszystkim:

- **z wykorzystaniem nawozów azotowych** (modyfikujących procesy zachodzące w glebach),
- **ze spalaniem paliw kopalnych, biopaliw i biomasy** (oprócz samego utleniania węgla dochodzi wtedy do wielu innych reakcji chemicznych ze składnikami paliwa i powietrza),

- z reakcjami chemicznymi podczas produkcji nawozów oraz niektórych tworzyw sztucznych,
- z procesami oczyszczania ścieków komunalnych.



Rysunek 7: Zmiany koncentracji tlenku azotu(I) w atmosferze (w cząstkach na miliard). Niebieskie kropki odpowiadają średnim miesięcznym, czerwona linia pokazuje średnie miesięczne po usunięciu wahań związanych ze zmianami pór roku.

Źródło: World Meteorological Organization (2019).

Jak możesz zobaczyć na wykresie powyżej, jego koncentracja w atmosferze stale rośnie. W 2018 wyniosła średnio $331,1 \pm 0,1$ ppb, co oznacza wzrost o 23% względem stanu sprzed roku 1750 (World Meteorological Organization, 2019).

FREONY I ICH NASTĘPCY

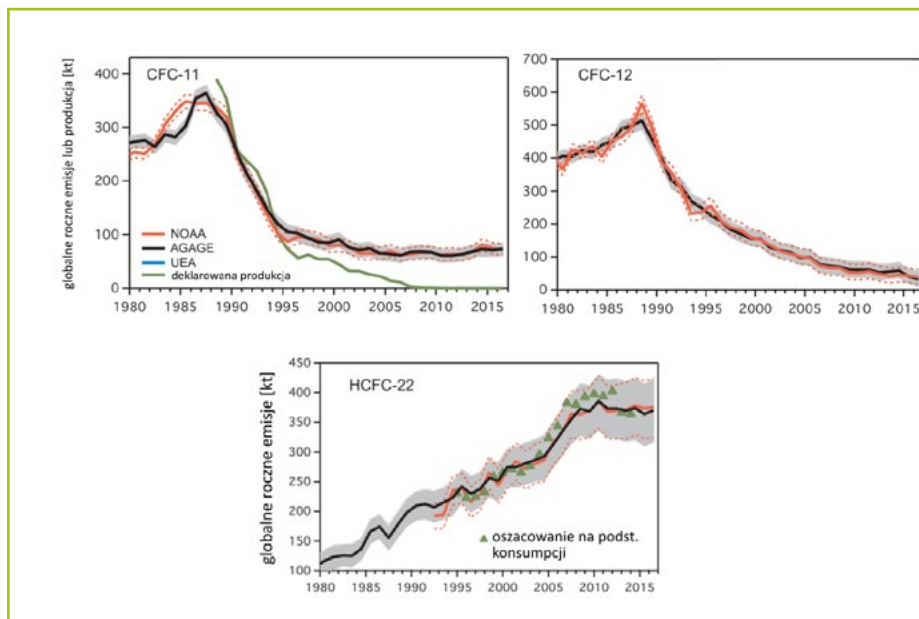
„Freony” to stosowana w Polsce potoczna nazwa chloro- i fluoropochodnych węglowodorów, czyli związków powstających przez zamienienie atomów wodoru (H) w metanie (CH_4), etanie (C_2H_6) czy propanie (C_3H_8) na atomy chloru (Cl) lub fluoru (F). Są nieszkodliwe dla człowieka, trwałe i niepalne, a jednocześnie łatwo jest je skraplać i odparowywać. Dzięki tym cechom doskonale sprawdzały się w wielu dziedzinach, na przykład w chłodnictwie czy jako gazy nośne dla produktów sprzedawanych w puszkach aerozolowych (np. deodoranty). Okazało się jednak, że związki te mają bardzo negatywny wpływ na środowisko:

- przyczyniają się do niszczenia występującej w wyższych partiach atmosfery warstwy ozonowej chroniącej powierzchnię Ziemi przed szkodliwym dla organizmów żywych promieniowaniem ultrafioletowym,
- są silnymi gazami cieplarnianymi, mogącymi poważnie wpłynąć na bilans energetyczny planety i przyczynić się do szybko postępującego ocieplenia klimatu (zwłaszcza, że są to substancje, których wcześniej w atmosferze ziemskiej nie było w ogóle – uwolnienie nawet niewielkiej ilości takich związków powoduje istotne zaburzenie bilansu).

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 Ściśle rzecz biorąc „Freon” to zarejestrowana przez producenta (The Chemours Company) nazwa handlowa grupy gazów obejmującej różne chloro- i fluoropochodne węglowodorów.

Z tych powodów na mocy tzw. Protokołu montrealskiego, podpisanego przez kraje świata w roku 1987, zostały objęte surową kontrolą i stopniowo wprowadzonym zakazem produkcji. Wycofywane z użycia związki CFC i ich następcy, HCFC, zostały na jakiś czas zastąpione gazami HFC (spójrz na wykres poniżej), które nie stanowią zagrożenia dla warstwy ozonowej, ale są gazami cieplarnianymi. Obecnie również ich produkcja podlega ograniczaniu, zgodnie z kolejną poprawką do Protokołu montrealskiego. Spadek emisji wybranego związku jest oczywiście opóźniony względem wycofania go z produkcji, ponieważ gazy są uwalniane do atmosfery, gdy zawierające je instalacje lub urządzenia ulegają rozszczelnieniu itp., czyli po jakimś czasie eksploataowania.



Czytając o freonach, możesz spotkać się z różnymi skrótami określającymi poszczególne związki chemiczne, na przykład:

CFC – *chlorofluorocarbons*, czyli pochodne węglowodorów, w których wszystkie atomy wodoru zamieniono na atomy chloru lub fluoru, w różnych proporcjach (np. CFC-11 ma trzy atomy chloru i jeden fluoru, CFC-12 – po dwa atomy każdego rodzaju),

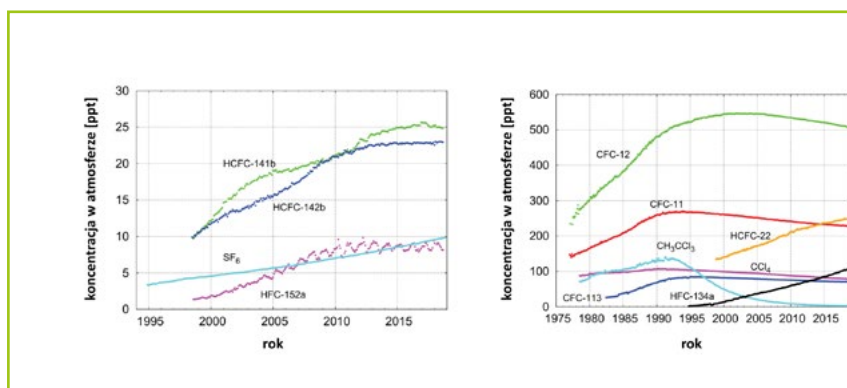
HCFC – *hydrochlorofluorocarbons*, czyli pochodne węglowodorów, w których tylko niektóre atomy wodoru zamieniono na atomy chloru lub fluoru,

HFC – *hydrofluorocarbons*, czyli pochodne węglowodorów, w których tylko niektóre atomy wodoru zamieniono na atomy fluoru.

Rysunek 8: Emisje (na podstawie opracowań agencji NOAA, AGAGE i UEA) lub produkcja (na podstawie deklaracji krajów) najpopularniejszych freonów, CFC-11 i CFC-12 i HCFC-22 (w kilotonach). W przypadku HCFC-22 podano także oszacowanie emisji na podstawie zużycia związku.

Źródło: World Meteorological Organization (2018).

W przypadku większości związków typu CFC i HFC mamy obecnie do czynienia ze spadkiem lub przynajmniej stabilizacją ich emisji i koncentracji w atmosferze. Spadek koncentracji następuje z istotnym opóźnieniem względem spadku emisji, ponieważ gazy te są bardzo trwałe i długo pozostają w atmosferze.



Rysunek 9: Zmiany koncentracji najważniejszych freonów i heksafluorku siarki (SF₆) w atmosferze (w cząstkach na bilion).

Źródło: World Meteorological Organization (2019).

W przemyśle, badaniach czy medycynie stale wykorzystuje się wiele związków chemicznych, z których część jest gazami cieplarnianymi niewystępującymi naturalnie w atmosferze (na przykład heksafluorek siarki, SF₆). Ich częściowy wykaz znajdziesz na przykład w tabeli 8.A.1. w ósmym rozdziale pierwszej części Piątego raportu podsumowującego Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu. Uwolnienie większej ilości tych gazów do atmosfery mogłoby spowodować znaczące zaburzenia w bilansie energetycznym planety. Na szczęście pomiary wskazują, że na razie nie miało to miejsca.



Więcej na temat freonów przeczytasz w tekstach:

Dziura ozonowa – historia sukcesu »

Przed czym uchronił nas Protokół Montrealski? »

Nowy nienowoczesny gaz cieplarniany »

Emisje gazów cieplarnianych z różnych sektorów gospodarki

Analizując wkład różnych sektorów gospodarki w emisje gazów cieplarnianych, należy pamiętać o różnicach pomiędzy poszczególnymi gazami oraz emisjami bezpośrednimi, pośrednimi i całkowitymi. Największe bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych płyną obecnie z energetyki.



Photo by Wim van 't Einde on Unsplash

W tym rozdziale chcielibyśmy przedstawić Ci, w jakim stopniu za emisje gazów cieplarnianych odpowiadają poszczególne sektory gospodarki. Jak już wiesz, w wyniku działalności człowieka do atmosfery uwalniane są różne gazy cieplarniane – przede wszystkim dwutlenek węgla, ale także metan, tlenek azotu(I) i freony. Aby dokonywać zbiorczych porównań między różnymi działaniami gospodarki, musimy wziąć pod uwagę je wszystkie. Jak to zrobić?

Jak już wiesz, poszczególne gazy mają różną budowę atomową, a więc i masę cząsteczek (na przykład masa atomowa cząsteczki dwutlenku węgla to $44u$ a metanu – $16u$), dlatego w każdym przypadku jednostka masy (na przykład tona) przekłada się na inną liczbę cząsteczek. Dodatkowo, każdy związek ma inną zdolność do nasilania efektu cieplarnianego, co zależy między innymi od tego, jakie długości fal pochłania oraz jego aktualnej koncentracji w atmosferze. Dlatego na potrzeby porównań przeliczamy masę poszczególnych gazów cieplarnianych na „ekwiwalent CO_2 ”.

EKWIWALENT CO_2 – sposób na określenie wpływu na efekt cieplarniany jednostki masy gazu cieplarnianego innego niż CO_2 , wartość ekwiwalentu odpowiada masie dwutlenku węgla, która wpłynęłaby na bilans energii Ziemi w tym samym stopniu.

DEFINICJA
EKWIWALENT CO_2

Całkowite emisje gazów cieplarnianych związane z działalnością człowieka wyniosły w roku 2018 $55,5 \text{ GtCO}_2\text{e}$ (ekwiwalentu dwutlenku węgla) (United Nations Environment Programme, 2019).

Analizując emisje związane z poszczególnymi sektorami, musimy wziąć pod uwagę także to, że mogą mieć one charakter pośredni lub bezpośredni:

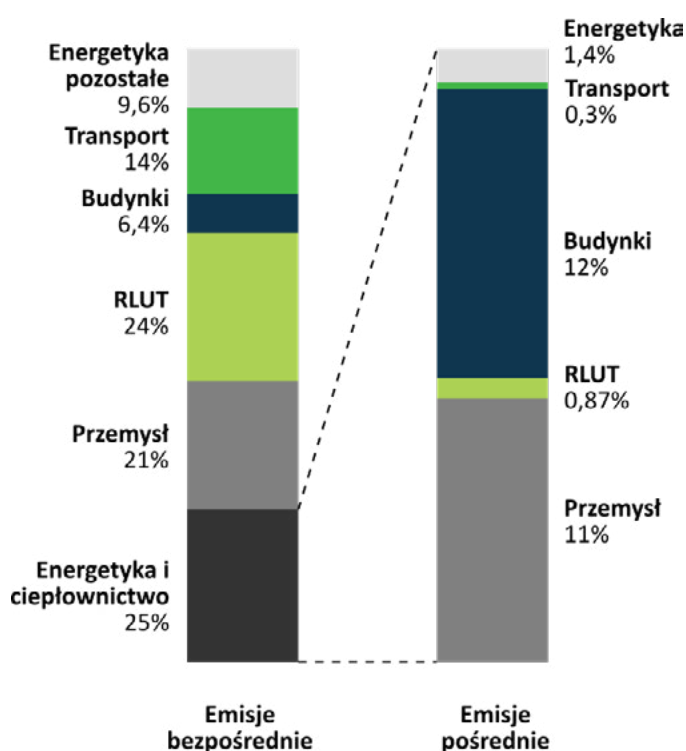
BEZPOŚREDNIE EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH – ilość gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery w danym sektorze czy przy danej działalności, na przykład: emisje ze spalania drewna w kominkach wchodzą w skład bezpośrednich emisji z budynków, a emisje metanu z ryżowisk to element bezpośrednich emisji z rolnictwa. Sposób na określenie wpływu na efekt cieplarniany jednostki masy gazu cieplarnianego innego niż CO_2 , wartość ekwiwalentu odpowiada masie dwutlenku węgla, która wpłynęłaby na bilans energii Ziemi w tym samym stopniu.

DEFINICJA
BEZPOŚREDNIE EMISJE
GAZÓW CIEPLARNIANYCH

POŚREDNIE EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH – ilość gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery w związku z produkcją towarów czy usług, z których dany sektor korzysta, na przykład: większość sektorów korzysta z prądu elektrycznego, który na ogół produkowany jest dzięki spalaniu paliw kopalnych, z czym wiążą się emisje gazów cieplarnianych do atmosfery.

DEFINICJA
POŚREDNIE EMISJE
GAZÓW CIEPLARNIANYCH

Emisje bezpośrednie i pośrednie ilustruje poniższy diagram. Zwróć uwagę, że całkowite emisje (suma bezpośrednich i pośrednich) związane z wybranym sektorem gospodarki mogą być dużo wyższe niż jego emisje bezpośrednie. Tak jest zwłaszcza w przypadku przemysłu i tzw. sektora „budynków”, w których duże ilości energii elektrycznej są wykorzystywane do napędzania urządzeń, utrzymywania komfortowej temperatury wewnątrz itd. Podział odpowiedzialności za emisje gazów cieplarnianych może więc zależeć od przyjętej konwencji. Korzystając z różnych źródeł danych o emisjach, należy zwrócić uwagę, czy i jakie emisje pośrednie uwzględniono w opracowaniach.



Rysunek 10: Podział całkowitych emisji gazów cieplarnianych (w przeliczeniu na ekwiwalent dwutlenku węgla) pomiędzy poszczególnymi sektorami gospodarki według danych z roku 2010, z wyróżnieniem emisji bezpośrednich i pośrednich (dane za IPCC, 2014). Skróty RLUT oznaczają rolnictwo, leśnictwo, użytkowanie terenu i jego zmiany. „Budynki” to budynki mieszkalne, komercyjne czy użyteczności publicznej.

ENERGETYKA I CIEPŁOWNICTWO

Większość energii elektrycznej jest obecnie wytwarzana poprzez spalanie paliw kopalnych. Wydzielane podczas ich spalania ciepło jest najczęściej zużywane do podgrzewania i odparowywania wody. Para napędza turbinę, której ruch służy do generowania prądu elektrycznego. Przy okazji otrzymujemy również ciepłą wodę, która może być użyta do ogrzewania budynków. Wykorzystanie paliw odpowiada za ok. 85% produkcji energii pierwotnej.

Energetyka odpowiada za większość związanych z działalnością człowieka emisji dwutlenku węgla, ale także za znaczną część (30–35%) emisji metanu (jak pamiętasz z poprzedniego rozdziału, jest on uwalniany podczas wydobywania paliw kopalnych oraz transportu i przetwarzania gazu ziemnego). Sumarycznie sektor ten odpowiada za ok. 35% antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, ale oczywiście większość energii jest użytkowana nie przez samą branżę energetyczną, a jej klientów.

PRZEMYSŁ

Przemysł odpowiada w sumie za ok. 30% antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych. W ok. 1/3 jest to efekt wykorzystania energii elektrycznej do napędzania wszelkiego rodzaju maszyn, jednak 2/3 to bezpośredni efekt procesów technologicznych, takich jak na przykład:

- **produkcja cementu** (w 2018 odpowiadała za ok. 3,5% całkowitej antropogenicznej emisji CO₂) (Friedlingstein i in., 2019),
- **produkcja stali** (CO₂ jest jednym z produktów reakcji zachodzących w piecach hutniczych),
- **produkcja tworzyw sztucznych** (której mogą towarzyszyć na przykład emisje N₂O).

ROLNICTWO, LEŚNICTWO, ZMIANY UŻYTKOWANIA TERENU (RLUT)

W zbiorczych podsumowaniach emisji sektory gospodarki takie jak rolnictwo, gospodarka leśna i inne związane z użytkowaniem terenu oraz jego zmianami ujmowane są często łącznie. Wynika to z przyczyn praktycznych – we wszystkich przypadkach mamy do czynienia z podobnymi działaniami (usuwanie i sadzenie roślin, nawadnianie czy odwadnianie gleby), a więc i tymi samymi procesami fizycznymi oraz biologicznymi prowadzącymi do emisji gazów cieplarnianych. Ponadto zmiany użytkowania terenu prowadzone są często na potrzeby rolnictwa lub leśnictwa albo polegają na zmianie kategorii terenu, np. z leśnej na rolniczą lub na odwrót. Rozdzielenie skutków poszczególnych przedsięwzięć pomiędzy odrębne sektory mogłoby więc być problematyczne.

Sektor RLUT odpowiada za 20–25% antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych. Dokładne oszacowanie jest trudne, ponieważ ta wartość tylko w niewielkim stopniu zależy od łatwych do ustalenia emisji związanych z wykorzystaniem energii elektrycznej czy paliw napędzających maszyny. W większości chodzi o emisje związane ze zmianami użytkowania terenu (aktualnie ok. 14% antropogenicznych emisji CO₂, Friedlingstein i in., 2019), erozją gleb (CO₂ i CH₄), użyciem nawozów sztucznych (N₂O), hodowlą zwierząt i użyciem nawozów naturalnych.

Energia pierwotna to energia „na wejściu”, na przykład uwalniana podczas spalania paliwa. Może być ona następnie zużywana do generowania prądu elektrycznego, prąd jest przesyłany do użytkownika i wykorzystywany w jakimś urządzeniu końcowym, na przykład maszynie produkcyjnej albo lampce biurkowej – na każdym z tych etapów jakaś część energii pierwotnej jest tracona.



HODOWLA ZWIERZĄT

Szczególnie obciążającym dla klimatu działem rolnictwa jest hodowla zwierząt, która odpowiada w sumie za ok. 14,5% całości antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych (Gerber i in., 2013). Składają się na to przede wszystkim:

- **emisje związane z wyżywieniem zwierząt:** zmiany użytkowania terenu na potrzeby pastwisk i upraw paszy, intensywnie – z użyciem dużej ilości nawozów sztucznych – uprawy roślin pastewnych, przetwarzanie i transport paszy, produkcja i transport nawozów itd. – ok. 45% emisji z hodowli,
- **metan powstający we wnętrzościach przeżuwaczy** – ok. 40% emisji z hodowli,
- **magazynowanie i przetwarzanie obornika** (czemu towarzyszą emisje metanu) – ok. 10% emisji z hodowli,
- **przetwarzanie mięsa**, przechowywanie oraz transport mięsa i produktów.

Wyprodukowanie żywności na bazie roślin wymaga, średnio rzecz biorąc, mniejszych nakładów (terenów uprawnych, wody, nawozów) i wiąże się z mniejszymi emisjami gazów cieplarnianych niż wyprodukowanie produktów odzwierzęcych o takiej samej wartości energetycznej. Wynika to z faktu, że w pierwszym przypadku roślina jest już podstawą produktu, a w drugim – trzeba wyhodować wystarczająco dużo roślin, by utrzymać zwierzęta przy życiu przez kilka miesięcy lub lat (nie cała spożywana przez zwierzęta pasza jest wbudowywana w ich organizmy, część jest zużywana na podtrzymanie procesów życiowych, a część zamieniana na ciepło lub odchody).



Szczegółowo na ten temat przeczytasz w artykule

Klimatyczny ślad kotleta. »

BUDYNKI

Pod pojawiającym się w podsumowaniach emisji hasłem „budynki” kryją się emisje związane z użytkowaniem budynków mieszkalnych, komercyjnych i użyteczności publicznej (18–19% całkowitych antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych). W większości (ok. 2/3) są one związane z zużyciem energii elektrycznej (do oświetlenia, ogrzewania, klimatyzacji, zasilania urządzeń gospodarstwa domowego i sprzętów elektronicznych) lub ciepłej (centralne ogrzewanie). 1/3 to emisje bezpośrednie – głównie dwutlenku węgla i metanu – z domowych palenisk (kotłów centralnego ogrzewania, kominków, kuchenek). Należy pamiętać, że dwutlenek węgla jest wydzielany w każdej reakcji spalania paliwa zawierającego węgiel.

TRANSPORT

Transport odpowiada za 14-15% emisji antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych. W większości ich źródłem jest obecnie bezpośrednie spalanie paliw zawierających węgiel w silnikach pojazdów. Największe emisje powodują:

- transport drogowy (samochody osobowe, ciężarowe, autobusy) – ok. 72%,
- transport lotniczy – ok. 11%,
- transport wodny – ok. 11%,

pozostałe źródła emisji to rurociągi, emisje pośrednie pojazdów elektrycznych, transport kolejowy (IPCC, 2014).

LOTNICTWO

Jak widzisz, emisje związane z lotnictwem to zaledwie ok. 11% emisji gazów cieplarnianych związanych z transportem. Czemu w takim razie tak dużo mówi się o szkodliwym wpływie latania na klimat? Wynika to z kilku kwestii:

- liczba pasażerów samolotu (zwłaszcza prywatnego lub w wyższych klasach) jest stosunkowo mała, a maszyna spala dużo paliwa na ich przewiezienie, co daje duże emisje na pasażera. W efekcie przelot samolotem może mieć poważny udział w rocznych emisjach gazów cieplarnianych związanych z wypełnianiem potrzeb konkretnej osoby;
- spaliny z silników lotniczych zawierają nie tylko dwutlenek węgla (który jest dobrze wymieszany w atmosferze i jest go pod dostatkiem także na wysokościach przelotowych), ale także:
 - parę wodną, której na ogół jest w wyższych partiach atmosfery niewiele, a która jest istotnym gazem cieplarnianym i w dodatku po skropleniu tworzy mające ocieplający wpływ na klimat smugi kondensacyjne i chmury cirrus,
 - tlenek azotu(I).

Wyemitowanie ich wysoko w atmosferze sprawia, że przebywają w niej dłużej i wpływają na bilans energetyczny silniej, niż gdyby wprowadzono je do atmosfery przy powierzchni Ziemi.

ODPADY

Czasami w podsumowaniach emisji z różnych sektorów gospodarki można znaleźć także „odpady”. Pod tym hasłem kryją się wysypiska, ścieki i tym podobne miejsca oraz zajmujące się nimi przedsiębiorstwa lub instytucje. Są one źródłami metanu i dwutlenku węgla emitowanych w wyniku rozkładania materii przez bakterie. W sumie odpowiadają za ok. 3,5% emisji gazów cieplarnianych. Emisje związane z odpadami produkowanymi przez konkretny dział gospodarki mogą być też zaliczone do emisji pośrednich z tej branży, podobnie jak te związane ze zużyciem energii elektrycznej.



Emisje gazów cieplarnianych a klimat

Największy wkład w obserwowane obecnie ocieplanie się klimatu ma wzrost koncentracji dwutlenku węgla.

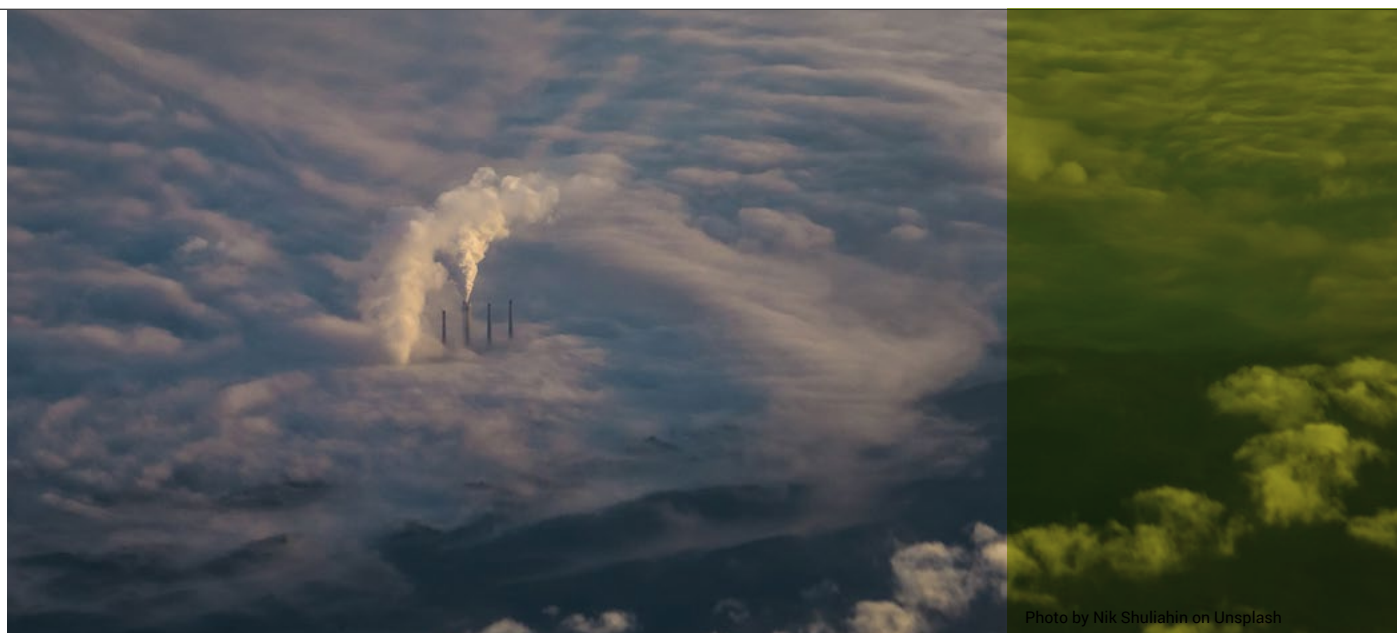
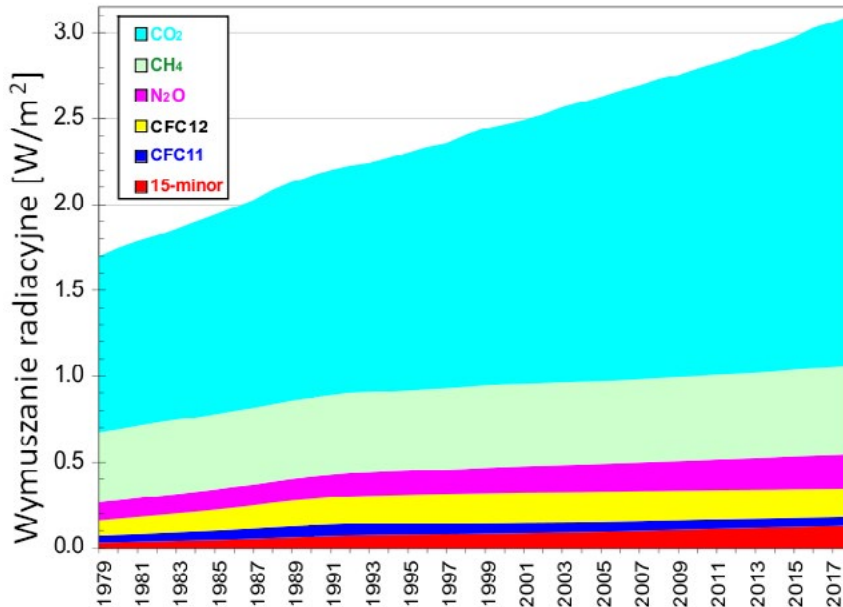


Photo by Nik Shuliahin on Unsplash

Jak pokazaliśmy w tej lekcji, działalność człowieka skutkuje emisjami różnych gazów cieplarnianych – zarówno takich, które już w niej występowały (CO_2 , CH_4 , N_2O), jak i zupełnie nowych (freony i inne gazy przemysłowe). Wykres na następnej stronie pokazuje, w jakim stopniu poszczególne gazy odpowiadają za obserwowany w ostatnich dekadach wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, nazywany też globalnym ociepleniem. Na skali pionowej wykreślono wymuszenie radiacyjne – wielkość mówiącą, jak występowanie konkretnego czynnika wpłynęło na ilość energii wydostającej się z atmosfery (w jednostce czasu, z jednostki powierzchni). Jest to bardzo dobra miara, bo jak pamiętasz z lekcji o bilansie energetycznym i efekcie cieplarnianym, wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje właśnie zatrzymywanie większej ilości energii w ziemskim systemie klimatycznym (a więc ograniczenie jej ucieczki w kosmos).

WYMUSZENIE RADIACYJNE – różnica między bilansem energetycznym planety w stanie wyjściowym i zaburzonym (po zadziałaniu określonego czynnika, np. wzroście koncentracji wybranego gazu cieplarnianego).

DEFINICJA
WYMUSZENIE
RADIACYJNE



Rysunek 11: Wkład poszczególnych gazów cieplarnianych w ocieplanie się klimatu, mierzony tzw. wymuszaniem radiacyjnym – wielkością, która mówi, jak obecność wybranego czynnika zmienia ilość energii wychodzącej z atmosfery w jednostce czasu, z jednostki powierzchni (czemu to ma znaczenie, przypomnisz sobie, zaglądając do lekcji drugiej). 15-minor to kategoria zbiorcza, obejmująca 15 rodzajów freonów.

Źródło: NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division.

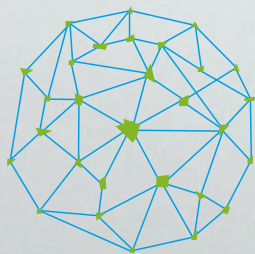
Jak widzisz, największy wkład we wzrost średniej temperatury ma wzrost koncentracji dwutlenku węgla – jest go najwięcej i jego emisje są najpowszechniejsze. Na drugim miejscu plasuje się metan, a na trzecim – tlenek azotu(I). Niepomijalny jest też wkład freonów i innych specjalistycznych gazów stworzonych przez człowieka i wykorzystywanych w chłodnictwie, przemyśle itd. Nawet małe emisje gazów cieplarnianych, których jest w atmosferze niedużo (lub nie ma ich wcale), istotnie wpływają na bilans energetyczny Ziemi. Dlatego, chociaż największą wagę przykładamy obecnie do ograniczenia emisji dwutlenku węgla, nie zapominamy też o kontroli produkcji i wykorzystania innych gazów.

Pisząc o emisjach gazów cieplarnianych, pominęliśmy jeden z nich – parę wodną. To nie przypadek. Zawartość pary wodnej w atmosferze dostosowuje się od jej średniej temperatury. Nawet jeśli para wodna trafia do atmosfery w wyniku działań człowieka (np. wydostaje się z chłodzi kominowych albo silników napędzanych wodorem), efekt jest niwelowany przez naturalne zjawiska: osłabienie parowania z powierzchni Ziemi oraz nasilenie skraplania pary w atmosferze. Nie jesteśmy w stanie trwale podnieść koncentracji pary wodnej w powietrzu inaczej, niż zwiększając średnią temperaturę planety. Para wodna zapewnia silne dodatnie sprzężenie dla zaburzeń klimatu, ale nie wymuszenie.



Więcej na ten temat przeczytasz w tekście:

Para wodna – klimatyczny „dopalacz”. »



KLIMATYCZNE ABC

TOMASZ ŻYLICZ
JAN WITAJEWSKI-BALTVILKS
ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

Dlaczego emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną?

Zapobieganie zmianom klimatycznym to niewątpliwie jedno z największych wyzwań stojących przed ludzkością. Wiemy, że do tych zmian przyczyniają się emisje gazów cieplarnianych, więc intuicyjnie rozumiemy, że aby ten problem rozwiązać, należy emisje zmniejszać. Eksperti z różnych dziedzin wskazują wiele sposobów ograniczania emisji gazów cieplarnianych: zmniejszenie emisyjności energetyki, ograniczenie konsumpcji, zwiększenie wydajności energetycznej, rozwój niskoemisyjnego transportu, regulacje prawne i inne.

Analizując skutki rozwiązań mających na celu ograniczenie zmian klimatycznych, należy pamiętać o tym, że zmiana jednego elementu w sposobie organizacji życia ludzi wpływa na wiele aspektów życia zarówno w danym kraju, jak i poza jego granicami. Np. ograniczenie korzystania z samochodów z silnikami spalinowymi w krajach rozwiniętych zmniejsza lokalny poziom emisji, ale jednocześnie zwiększa eksport używanych samochodów do krajów, w których nie ma takich ograniczeń, i w ten sposób częściowo przenosi emisje generowane przez samochody w inne miejsce planety.

Aby ocenić pełen wpływ działań mających na celu ograniczenie katastrofy klimatycznej, należy analizować je w sposób kompleksowy, uwzględniając wzajemne zależności sektorów gospodarki, międzynarodowe powiązania handlowe i koszty rozwiązań alternatywnych wobec obecnie stosowanych.

W poniższym rozdziale przedstawimy dwa aspekty, na które należy zwrócić szczególną uwagę. Klimat planety jest dobrem wspólnym, dlatego oceniając efekty działań proklimatycznych, należy uwzględniać sektorowe i międzynarodowe powiązania gospodarcze. Należy też obiektywnie porównywać wpływ różnych czynników na poziom emisji. Pomocne w takiej analizie może być proste równanie matematyczne, nazywane „tożsamością Kai”.

Klimat jako dobro publiczne

Klimat jest dobrem publicznym, czyli takim, z którego wszyscy korzystamy i na które wszyscy wpływamy. Z tego powodu skuteczne dbanie o klimat wymaga wspólnego, skoordynowanego działania i unikania tzw. „jazdy na gapę”.

Podjęcie działań chroniących klimat w skali światowej jest dużym wyzwaniem, ale wiemy, jak należy dążyć do ich wprowadzenia.

CO JEST DOBREM PUBLICZNYM?

W ekonomii przymiotnik „publiczny” ma ściśle określone znaczenie.

Dobro publiczne spełniają dwie zasady:

- niewykluczalności
- i niekonkurencyjności.

Pierwsza głosi, że jeśli tylko dobro zostało dostarczone, to nie można nikogo łatwo wykluczyć z grona korzystających.

Druga zaś stwierdza, że wykorzystanie dobra przez jednego użytkownika nie przeszkadza, by z niego mógł równocześnie korzystać ktoś inny.



Photo by Kenneth Carpina from Pexels

Klimat jest szczególnym dobrem publicznym, ponieważ w oczywisty sposób spełnione są obydwie zasady.

Jeśli klimat się psuje albo poprawia, to nikogo nie da się wykluczyć z grona objętych oddziaływaniem: konsekwencje dotyczą wszystkich. Innymi słowy, z jego ochrony mogą korzystać wszyscy, niezależnie od tego, czy się do niej przyłożyli. Ale i na odwrót: psucie klimatu szkodzi wszystkim, także tym, którzy nie są za to odpowiedzialni.



Więcej możesz przeczytać tu:

O dobrach publicznych można przeczytać w każdym podręczniku mikroekonomii – np. H. Varian, *Mikroekonomia. Kurs średni – ujęcie nowoczesne*, Warszawa PWN 2019.



Więcej możesz przeczytać:

W języku polskim informacje na temat ochrony klimatu z punktu widzenia ekonomii znajdują się w artykułach popularnonaukowych prof. Tomasza Żylicza publikowanych w miesięczniku „Aura”: np. 8/2019, 9/2018. »

Oświetlenie uliczne jest typowym przykładem dobra publicznego – nikogo nie można wykluczyć z korzystania, a fakt, że ktoś korzysta z oświetlenia, nie przeszkadza innym w korzystaniu z niego równocześnie.

JAZDA NA GAPE

Od wielu pokoleń ekonomiści analizują mechanizmy dostarczania dóbr publicznych. Występująca wtedy swego rodzaju „odpowiedzialność zbiorowa” wywołuje zjawisko znane jako **„jazda na gapę” (ang. free riding)**. Jej skutek określa się w żargonie jako „niedostateczną podaż dóbr publicznych”, co w zwykłym języku oznacza podejmowanie ochrony klimatu w niedostatecznej skali.

Z uwagi na „jazdę na gapę”, niewielu kwapi się, żeby chronić klimat. **Niektórzy mogą nie życzyć sobie, żeby z owoców ich wysiłku korzystali także ci, co nic nie zrobili.** Bardziej typowym motywem niepodjęcia potrzebnego wysiłku jest jednak **oczekiwanie, że wysiłek zostanie podjęty przez kogoś innego**, a wtedy – na podstawie zasady niewykluczalności – i tak będzie można korzystać z jego owoców.

ZARZĄDZANIE DOBRAMI PUBLICZNYMI

Dobra publiczne – których znanymi od dawna przykładami są ład przestrzenny, obrona przeciwlotnicza czy jakość powietrza – mogą być dostarczane w dostatecznej podaży, jeśli jest za nie odpowiedzialny pojedynczy podmiot. I tak, rząd może podjąć decyzję o stworzeniu obrony przeciwlotniczej, która służyłaby całemu krajowi, niezależnie od tego, czy wszyscy potencjalni beneficjenci byłiby gotowi solidarnie podjąć taką decyzję (pewnie nie wszyscy by w tym chcieli partycypować, zważywszy na możliwość „jazdy na gapę”). Podobnie samorząd terytorialny może wprowadzić ład w przestrzennym zagospodarowaniu, który przypuszczalnie nie powstałby, gdyby decyzje lokalizacyjne miały być podejmowane spontanicznie.

Klimat jest jednak szczególnym dobrem publicznym. Zmienia się w skali całej planety i żaden jej zakątek nie dysponuje luksusem niezależności.

Nie ma jednak rządu globalnego i nie zanosi się na to, żeby szybko powstał. Dlatego tak istotne jest ustalenie ponadnarodowego, wiążącego porozumienia, obejmującego wszystkie lub chociaż zdecydowaną większość krajów. Wspólne działania rządów mogą zapewnić skuteczną ochronę światowego klimatu, podobnie jak rządy mniejszych jednostek terytorialnych zapewniają dostateczną podaż dóbr publicznych ograniczoną do ich jurysdykcji.

Namiastkę rządu globalnego stanowi ONZ, mająca nawet swojego przewodniczącego (którym jest Sekretarz Generalny). Ale kompetencje ONZ są bardzo ograniczone, a w sprawach klimatu sprowadzają się do przygotowywania porozumień międzynarodowych.



Więcej możesz przeczytać:



Najważniejszą pozycją analizującą ochronę klimatu metodami ekonomicznymi jest R.S.J. Tol, *Climate Economics. Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy*, Edward Elgar, Cheltenham (2014 i późniejsze wydania).



Starania dotyczące przełamania „jazdy na gapę” można prześledzić, czytając blog prof. Stavinsa z Harvardu »



Photo by Markus Spiske temporaus.com from Pexels

TRAGEDIA WSPÓLNEGO PASTWISKA

Problem skutecznego zarządzania środowiskowymi dobrami publicznymi opisywany jest w literaturze jako **tragedia wspólnego pastwiska (ang. Tragedy of the Commons)**. Warunkiem takiego rozwiązania jest, aby wykorzystanie zasobu naturalnego nie przekroczyło jego zdolności do samodzielnego odnawiania się (wszak ryby się mnożą, trawa na pastwisku rośnie, a naturalne procesy w pewnym stopniu stabilizują klimat).

W przypadku klimatu decyzje, które mogą podjąć poszczególne kraje, można zilustrować tak jak poniżej. Korzyści (○) lub straty (○) dla danego państwa są pokazane w kółkach.

		PAŃSTWO 2	
PAŃSTWO 1	DECYZJA	ograniczać emisje	nie ograniczać emisji
	ograniczać emisje	1 1	-2 3
	nie ograniczać emisji	3 -2	-1 -1

Dlaczego dzieje się tak, że w tak opisanych jak w powyższej tabelce wyborach, racjonalnie zachowujące się państwo nie zdecyduje się na ograniczanie emisji? Dlaczego najlepsze rozwiązanie 1 1, w którym oba państwa mają korzyść, a korzyść łączna jest największa, nie jest wybierane, gdy każde z państw zachowuje się – ze swojego punktu widzenia – racjonalnie?

Zauważmy, że decyzja „nie ograniczać emisji” daje wyższe korzyści niezależnie od tego, co zrobi drugi kraj (3 to więcej niż 1, a -1 jest lepsze niż -2). A ponieważ ludzie w obu krajach myślą tak samo, efektem ich wspólnych decyzji jest wybór najgorszego rozwiązania, w którym oba kraje tracą -1 -1.

Ten prosty schemat decyzyjny pokazuje, dlaczego podjęcie wspólnej decyzji o podjęciu działań ograniczających emisje gazów cieplarnianych jest trudne. Na szczęście porozumienie jest możliwe, ale wymaga chęci współpracy oraz zaufania wobec drugiej strony. Decyzja o skoordynowanym, wspólnym działaniu jest tym trudniejsza, im więcej stron ma się na nie zgodzić. Bardzo trudno jest podjąć skoordynowane działania ograniczające zmiany klimatyczne, bo wymaga to uczciwego zaangażowania wszystkich krajów świata.



Komiksy:

Ciekawe komiksy pokazujące jak w praktyce może dojść do wyczerpania wspólnego zasobu

odnawialnego - żywność dla reniferów na wyspie Świętego Mateusza »

nieodnawialnego - zasoby ropy naftowej »



O problemie wspólnego pastwiska można przeczytać tu:

Klasyczny artykuł, który spopularyzował pojęcie „tragicii wspólnego pastwiska”: Hardin, G. (1968). *The Tragedy of the Commons*. „Science”, 162(3859), 1243 LP – 1248. »

Ansari, S. S., Wijen, F., & Gray, B. (2013). *Constructing a climate change logic: An institutional perspective on the “tragedy of the commons”*. „Organization Science”, 24(4), 1014–1040 »

KONWENCJA KLIMATYCZNA

W 1992 roku, w Rio de Janeiro w Brazylii, podpisano obowiązującą do dziś Ramową Konwencję do spraw Zmian Klimatu (Framework Convention on Climate Change, FCCC). Tak jak we wszystkich porozumieniach międzynarodowych, udział w niej jest dobrowolny.

Dobrowolności tej konwencji klimatycznej towarzyszy powszechność; jej stronami jest 197 państw, czyli praktycznie cała ONZ.

Ale ową powszechność osiągnięto za cenę braku zobowiązań dla przytłaczającej większości sygnatariuszy. Jest to defekt najbardziej znanego uzupełnienia konwencji – Protokołu z Kioto przyjętego w 1997 roku; przewidziane w nim zobowiązania dotyczą jedynie kilkudziesięciu krajów uznanych w latach 70. XX w. za uprzemysłowione, w których zresztą emisja dwutlenku węgla i tak nie rośnie. Wzrasta natomiast w krajach, które takich zobowiązań nie przyjmują.

Dopiero Porozumienie Paryskie z 2015 roku objęło zobowiązaniami zdecydowaną większość emitentów dwutlenku węgla, a więc stało się pierwszym krokiem mającym na celu przełamanie „jazdy na gapę”. Jest to jednak krok bardzo niewielki, ponieważ zobowiązania są dobrowolne i obejmują obietnice ograniczenia emisji w stopniu, który nie pozwala na skuteczną ochronę klimatu. Zrealizowanie zadeklarowanych w Porozumieniu Paryskim działań ograniczających emisje pozwoli na zmniejszenie wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi do 2100 roku do ok. 3,5°C względem poziomu przedprzemysłowego w porównaniu do około 5°C bez tych działań. To znacznie więcej niż wzrost o 1,5–2°C, dający w opinii naukowców szansę na uniknięcie przekroczenia groźnych punktów krytycznych i uniknięcia katastrofy klimatycznej.

Szczegółowe informacje o porozumieniach klimatycznych można znaleźć na oryginalnej stronie UNFCCC – The United Nations Framework Convention on Climate Change; <https://unfccc.int/> (po angielsku) oraz po polsku na stronie Komisji Europejskiej: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations_pl

W KIERUNKU SKUTECZNEJ OCHRONY KLIMATU

Zmagania towarzyszące konwencji klimatycznej ilustrują typowy problem gospodarowania dobrem publicznym. Jest ono dostarczane w niedostatecznej podaży, jeśli nie ma podmiotu sprawującego władzę nad obszarem, którego dotyczy zasada niewykluczalności.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że przewaga korzyści z tytułu ochrony klimatu nad jej kosztami nie może przełamać „jazdy na gapę”. Podobnie przewaga strat z tytułu niepodjęcia tej ochrony nad uzyskanymi w ten sposób „oszczędnościami” nie spowoduje, że zjawisko „jazdy na gapę” przestanie występować. Nie istnieje bowiem podmiot decyzyjny (rząd światowy), który mógłby podjąć decyzje skutkujące osiągnięciem globalnych korzyści i zapewnić ewentualną rekompensatę dla tych, co mają nieproporcjonalnie mały udział w korzyściach.



Tekst Deklaracji
z Konferencji
w Rio de Janeiro, 1992 »

1992 Rio de Janeiro

Porozumienie podpisane przez wszystkie kraje



1997 Kioto

Kraje zobowiązane do redukcji emisji CO₂ (z Aneksu I)



2015 Paryż

Tylko Iran i Turcja nie podpisały porozumienia
W 2019 roku USA rozpoczęło proces wycofywania się z porozumienia



Więcej obejrzyj i przeczytasz tu:

Wykład (po angielsku) o wzroście
wykładniczym: Arithmetic, Population
and Energy – a talk by Al Bartlett »

Wystąpienie Davida Attenborough
o przeludnieniu »

Szczegółowy opis porozumienia
z Kioto »

Aby przezwyciężyć ten kryzys, decydenci rządzący krajami świata powinni wspólnie uznać klimat za dobro publiczne wymagające ochrony, a następnie wprowadzić odpowiednie rozwiązania prawne. Istotna jest też zgoda na podjęcie działań zniechęcających do „jazdy na gapę”.

Niemożliwość podjęcia skutecznej ochrony klimatu wobec braku rządu światowego, ani odpowiedniego porozumienia międzynarodowego nie oznacza, że jesteśmy wobec problemu całkiem bezradni. Potrzebne jest rozpowszechnianie wiedzy na temat tego problemu oraz wzrost poparcia społeczeństw – również w krajach mniej zamożnych – dla ochrony klimatu. Jest to konieczne, aby politycy byli gotowi poprzeć międzynarodowe porozumienia skutecznie redukujące emisje gazów cieplarnianych.

ADAPTACJA DO ZMIAN KLIMATYCZNYCH

Adaptacja do zmian klimatycznych nie ma globalnego charakteru tak jak ochrona klimatu. Może być podejmowana na szczeblu znacznie niższym, np. przez lokalne rządy. Polega ona bowiem na działaniach, które mogą być skuteczne niezależnie od tego, co robią inni. Sadzić drzewa, żeby dać ludziom schronienie przed falami upałów, można na szczeblu lokalnym. Podobnie na szczeblu lokalnym mogą być podejmowane działania zmierzające do poprawy retencji wody itd.

Należy jednak podkreślić, że chociaż adaptacja do zmian klimatycznych jest konieczna, nie może zastępować starań o ochronę klimatu. Drastyczna zmiana klimatu, która wystąpi, gdy nie zostaną podjęte działania skutecznie ograniczające emisje, znacznie przekracza możliwości adaptacji.



Tożsamość Kai

– źródła wzrostu emisji

Na podstawie rozdziału 5 w raporcie IPCC 5th Assessment Report, Working Group 3.

W poprzednich lekcjach przedstawiliśmy temat wzrostu emisji gazów cieplarnianych – jego historię, główne źródła emisji, rodzaje gazów cieplarnianych oraz fizyczne aspekty tego zjawiska.

W tym rozdziale przyjrzymy się przyczynom wzrostu emisji w sposób przedstawiony w raporcie IPCC, gdzie tłumaczy się go za pomocą trzech rodzajów analiz: dzieląc wzrost na regiony geograficzne, na sektory oraz na czynniki socjoekonomiczne.

Zrozumienie przyczyn wzrostu emisji, a w szczególności jego przyspieszenia na początku XXI w., pozwala nam odpowiedzieć na ważne pytania:

- Jakiego wzrostu możemy spodziewać się w przyszłości, jeżeli nie podejmiemy się wysiłku zmierzającego do dekarbonizacji globalnej gospodarki?
- Z jakimi wyzwaniami musi zmierzyć się wspólnota międzynarodowa przy projektowaniu skutecznej i sprawiedliwej polityki klimatycznej?

Jedno matematyczne równanie pozwala nam w poukładany sposób opisać socjoekonomiczne źródła wzrostu emisji:

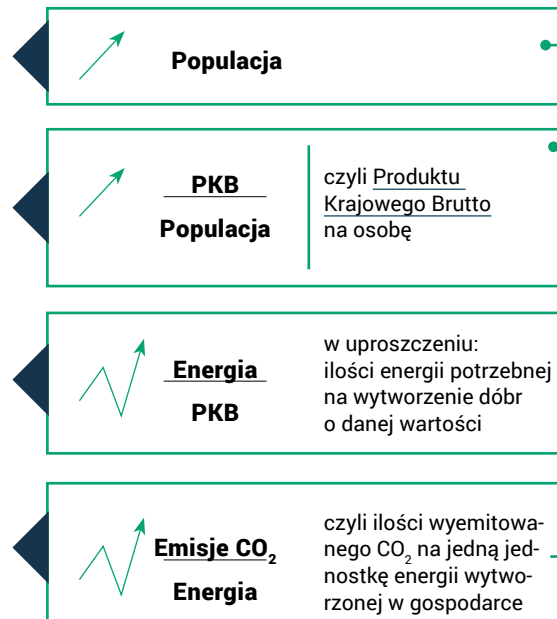
$$\text{Emisje CO}_2 = \text{Populacja} \times \frac{\text{PKB}}{\text{Populacja}} \times \frac{\text{Energia}}{\text{PKB}} \times \frac{\text{Emisje CO}_2}{\text{Energia}}$$

To równanie jest nazwane „tożsamością Kai”. Nie opiera się ono na żadnych założeniach, to znaczy jest prawdziwe w każdych warunkach i w każdym czasie (aby to zobaczyć, wystarczy skrócić liczniki i mianowniki po jego prawej stronie).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu) – jest to naukowe i międzyrządowe ciało doradcze, utworzone w 1988 r. Celem IPCC jest dostarczenie obiektywnej, naukowej informacji na temat zmiany klimatu. Głównymi dokumentami publikowanymi przez IPCC są raporty na temat zmiany klimatu, jej konsekwencji, możliwości adaptacji oraz ograniczenia ocieplenia. IPCC nie prowadzi pomiarów, obserwacji ani innego rodzaju badań. Swoje opracowania opiera na opublikowanych wcześniej przez naukowców z całego świata artykułach naukowych.

Dlaczego zatem korzystamy z takiego specyficznego równania? Jest ono przydatne, bo pozwala nam opisać wpływ czterech podstawowych czynników determinujących wzrost emisji:

- wzrostu demograficznego,
- wzrostu zamożności społeczeństw,
- zmiany energochłonności gospodarki,
- zmiany uzależnienia wytwarzania energii od paliw kopalnych, czyli ropy, gazu i węgla.



Produkt Krajowy Brutto (PKB) – jest to łączna, wyrażona w pieniądzu, wartość wszystkich dóbr i usług wytworzonych w danym kraju zazwyczaj w ciągu roku lub kwartału.

Przyglądając się „tożsamości Kai”, możemy wyprowadzić kilka ciekawych wniosków. Po pierwsze, samo ograniczenie konsumpcji ($\frac{\text{PKB}}{\text{Populacja}}$) nie pozwala zredukować emisji do zera. Po drugie, jest możliwe rozdzielanie (tzw. decoupling) wzrostu emisji od wzrostu gospodarczego, pod warunkiem zmiany struktury produkcji w gospodarce (zmiany w czynnikach $\frac{\text{Energia}}{\text{PKB}}$ oraz $\frac{\text{Emisje CO}_2}{\text{Energia}}$). Ciekawym epizodem takiego rozdzielania był szybki wzrost gospodarczy w Polsce latach 90., któremu towarzyszył spadek emisji. Po trzecie, ograniczenie konsumpcji lub wzrostu populacji będzie niezbędne, jeżeli głębokie zmiany w sposobach produkcji w gospodarce nie będą możliwe.

Pierwszy czynnik – demografia – zależy głównie od czynników kulturowych. Ograniczenie wzrostu populacji z uwagi na chęć ograniczenia emisji jest trudnym tematem, który wymagałby szerokiej dyskusji. Jest jednak mało prawdopodobne, aby globalne trendy demograficzne uległy zmianie nawet przy zgodzie wspólnoty międzynarodowej.

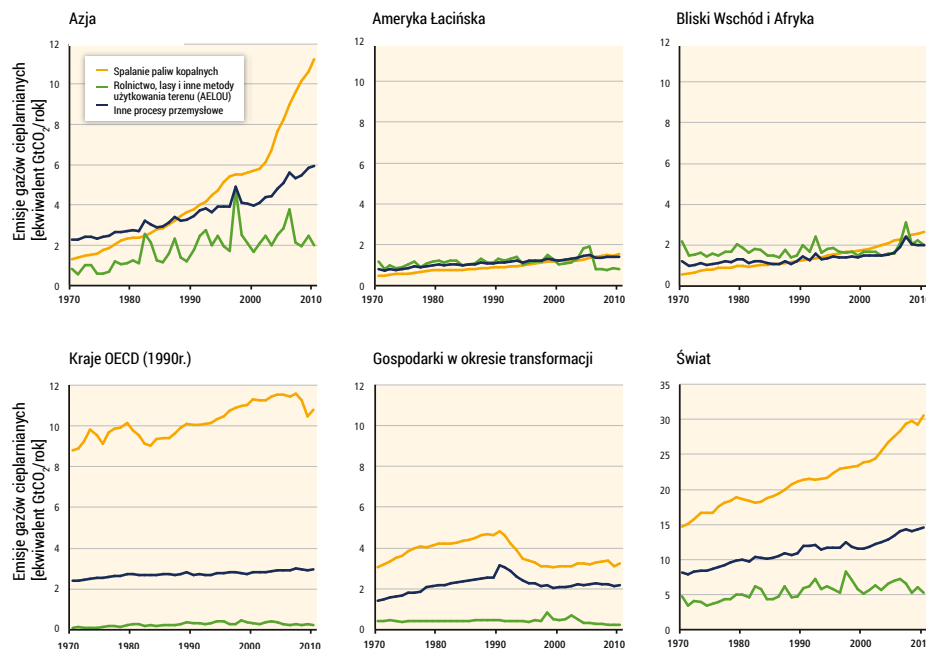
Drugi czynnik, zamożność (rozumiana jako konsumpcja na osobę), zależy od produktywności globalnej gospodarki. Produktywność ta jest zdeterminowana przez szereg czynników (wykształcenia, regulacji, kapitału społecznego i technologii), jednak jej wzrost w długim okresie zależy przede wszystkim od tempa postępu technologicznego.

Zmiany trzeciego i czwartego czynnika, czyli energochłonności gospodarki i sposobu wytwarzania energii, są zdeterminowane głównie przez tempo oraz kierunek zmian technologicznych. Dla przykładu, wynalezienie maszyny parowej prowadziło do wzrostu energochłonności gospodarki, ale wynalezienie nowych materiałów izolacyjnych pozwala na ograniczanie zużycia energii w domach przy tym samym poziomie komfortu dla mieszkańców. Rozwój

turbin parowych w XIX w. spopularyzował pozyskiwanie energii z paliw kopalnych (kosztem odejścia na przykład od młynów na rzece). Natomiast rozwój turbin wiatrowych na początku XXI w. pozwala na odchodzenie od wytwarzania energii ze spalania węgla.

Dodatkowo energochłonność i sposób wytwarzania energii zależy od nastawienia (na przykład proekologicznych preferencji) konsumentów oraz regulacji prawnych.

Raport IPCC zwraca uwagę, że w ostatnich dziesięcioleciach podstawową przyczyną wzrostu emisji był wzrost konsumpcji (zobacz panel w prawym dolnym rogu wykresu 1). Tempo zmniejszenia energochłonności globalnej gospodarki, które miało miejsce w tym czasie, było niewystarczające, aby przeważać wzrost konsumpcji. Oznacza to, że globalne zużycie energii wzrosło. „Tożsamość Kai” wskazuje, że teoretycznie ten wzrost mógłby zostać skompensowany zmniejszeniem ilości emisji na jednostkę energii. Taka zmiana rzeczywiście miała miejsce, ale jej tempo było niewystarczające. Z tego powodu całkowite emisje na świecie rosły.



Warto jednak zauważyć, że przyczyny wzrostu emisji znacząco różnią się między regionami (wykres 1). **W Azji wzrost ten wynikał z bardzo szybkiego wzrostu zamożności konsumentów.** Wzrost emisji byłby tam jeszcze większy, gdyby nie bardzo szybkie zmniejszenie energochłonności gospodarki. Wzrost populacji w tamtym regionie odgrywał relatywnie mniejszą rolę. **Niemal odwrotną historię można zauważyć w przypadku Afryki i Bliskiego Wschodu (region MEA).** W tym regionie to wzrost populacji był główną przyczyną wzrostu emisji. Zaobserwowano tu również wzrost energochłonności gospodarki. Gdyby zamożność (czyli produkcja na osobę) w regionie MEA rosła tak samo szybko jak w Azji, wzrost emisji w MEA byłby bardzo duży. Wzrost zamożności był jednak bardzo skromny.

W krajach rozwiniętych (region OECD), wzrost zamożności był niemal zrównoważony przez spadek energochłonności. Emisje w tym regionie wzrosły

Wykres 1. Dekompozycja emisji CO₂ w regionach świata. Źródło: IPCC AR5 WG3.

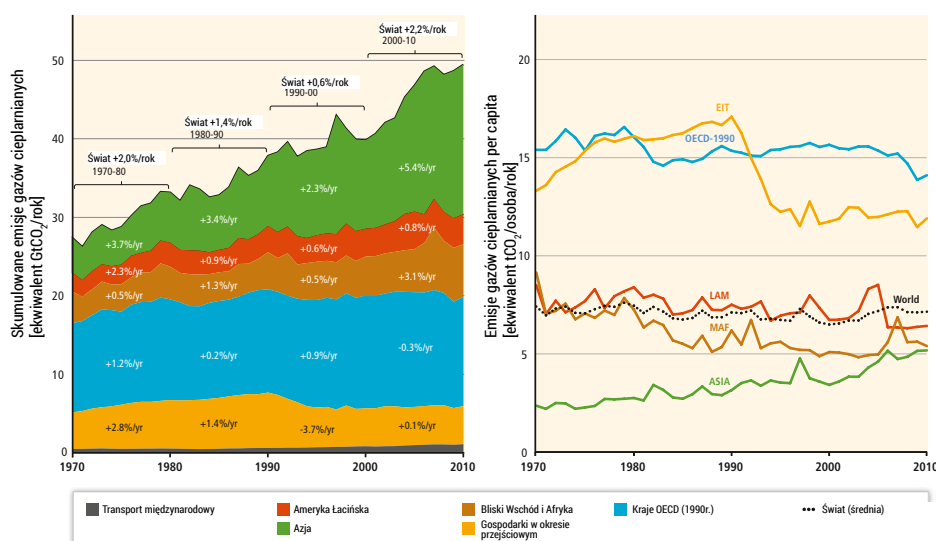
Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju) – organizacja międzynarodowa o profilu ekonomicznym, skupiająca 36 wysoko rozwiniętych i demokratycznych państw. Celem OECD jest wspieranie państw członkowskich w osiągnięciu jak najwyższego poziomu wzrostu gospodarczego i stopy życiowej obywateli.

nieznacznie. Ciekawy obraz rysuje się dla regionu gospodarek przechodzących transformację (do których w raporcie IPCC zaliczała się Polska) w okresie 1990–2010. W tym czasie wystąpił jednocześnie bardzo gwałtowny wzrost za-
możności i spadek energochłonności. Spadek energochłonności nie miał miej-
sca w regionie Ameryki Łacińskiej. W tym regionie wzrost produkcji i wzrost
populacji przełożył się na znaczny wzrost emisji.

Porównanie wzrostu emisji w różnych regionach wskazuje na potencjalne
problemy z redukcją globalnych emisji w przyszłości. Największym problemem
wydaje się być Afryka. Realizacja Celów Zrównoważonego Rozwoju (Susta-
inable Development Goals) wyznaczonych przez ONZ wymagałaby znacznego
wzrostu konsumpcji w tym regionie. Jeżeli ten wzrost nałoży się na dalszy
wzrost populacji i energochłonności tamtejszych gospodarek, doprowadzi to
do niespotykanego wcześniej wzrostu emisji. Historyczne trendy sugerują, że
trudno spodziewać się zatrzymania wzrostu emisji w innych regionach roz-
wijających się. Nie udało się także ograniczyć emisji w krajach rozwiniętych.

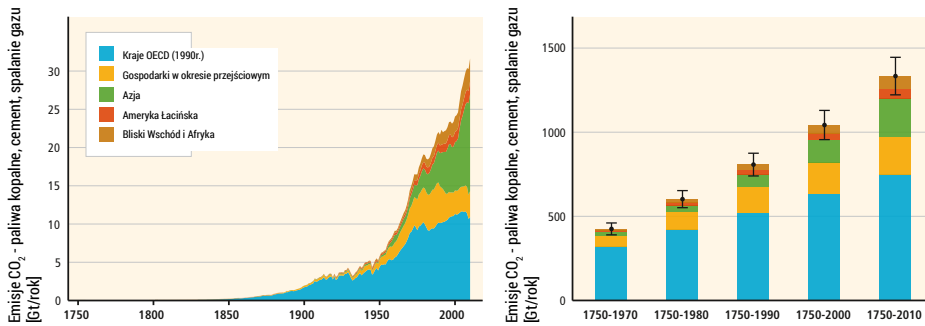
**Zmniejszenie emisji w perspektywie następnych dziesięcioleci wymagałoby
więc radykalnego wysiłku we wszystkich regionach.**

**Kraje rozwijające się podkreślają jednak, że przy sprawiedliwym podziale
tego wysiłku należy uwzględnić nierówne poziomy emisji dzisiaj w regio-
nach i historyczną odpowiedzialność za koncentrację gazów cieplarnianych
w atmosferze.** Chociaż najszybszy wzrost emisji odnotowano w Azji, to nawet
dzisiaj emisje na osobę w tym regionie są kilkukrotnie niższe niż emisje na
osobę w krajach rozwiniętych (OECD) – zobacz prawy panel na wykresie 2.
Także w innych regionach krajów rozwijających się emisje na osobę utrzymują
się zdecydowanie poniżej poziomu krajów z regionu OECD. **Jeżeli porównamy
całkowite emisje w okresie 1750–2010, okaże się, że ponad połowa z nich
pochodzi z krajów z regionu OECD** (prawy panel na wykresie 3).



Wykres 2. Trendy całkowitej emisji (lewy panel) i emisji na osobę (prawy panel) gazów cieplarnianych w regionach świata.

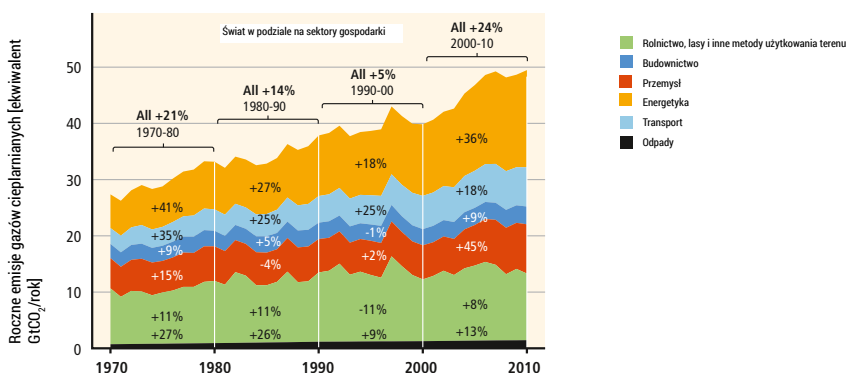
Źródło: IPCC AR5 WG3.



Wykres 3. Emisje (lewy panel) i skumulowane emisje (prawy panel) w regionach świata.

Źródło: IPCC AR5 WG3.

Trzecim sposobem na zrozumienie źródeł wzrostu globalnych emisji jest dekompozycja sektorowa. Wykres 4 wskazuje, że w skali globalnej najważniejszą przyczyną jest wzrost emisji w sektorze energetyki (odpowiedzialnym za wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła). Bardzo duży wzrost emisji zanotowano także w sektorze transportowym. Dobrą wiadomością jest to, że w obu sektorach znamy już potencjalne technologie, które mogłyby zredukować emisje. W sektorze energetycznym są to przede wszystkim odnawialne źródła energii oraz energia nuklearna. W sektorze transportowym są to środki transportu wykorzystujące energię elektryczną oraz (potencjalnie) paliwa syntetyczne. Znacznie trudniejsze wydaje się ograniczenie emisji w przemyśle. Teoretycznie jest to możliwe przez elektryfikację produkcji oraz wykorzystanie paliw syntetycznych, jednak wiele z technologii niezbędnych do takiej zmiany nie jest jeszcze gotowych do wykorzystania na szeroką skalę. Jeszcze trudniejsza może okazać się redukcja w sektorze rolnictwa (szczególnie biorąc pod uwagę spodziewany wzrost populacji). W tym przypadku konieczna może okazać się zmiana nawyków żywieniowych, szczególnie zmniejszenie spożycia wołowiny, mleka i jego przetworów, których produkcja wiąże się z bardzo dużą emisją gazów cieplarnianych.



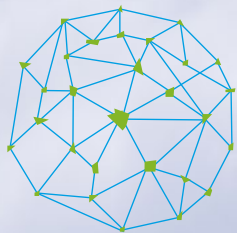
Wykres 4. Źródła emisji gazów cieplarnianych w globalnej gospodarce w podziale na sektory.

Źródło: IPCC AR5 WG3.



Materiały uzupełniające:

Statystyki dla Kaya Identity »



KLIMATYCZNE ABC

MAGDALENA BUDZISZEWSKA
ALEKSANDRA KARDAŚ
ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

Fakty i mity o zmianie klimatu

Z dotychczasowych lekcji wiesz już, w jaki sposób działalność człowieka doprowadziła do globalnej zmiany klimatu – wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi. Dokonałiśmy tego, emitując gazy cieplarniane (przede wszystkim dwutlenek węgla pochodzący ze spalania paliw kopalnych) i zmieniając w ten sposób bilans energetyczny naszej planety. Takich skutków rozwoju przemysłu spodziewano się już w XIX wieku (czytaj więcej: Historia badań klimatu). To, że nastąpiły, potwierdza, że trafnie rozumiemy i opisujemy działanie klimatu.

W pierwszych dwóch rozdziałach tej lekcji przeczytasz o dowodach na antropogeniczne (spowodowane działalnością człowieka) pochodzenie współczesnej zmiany klimatu. Współczesne zrozumienie działania systemu klimatycznego Ziemi jest dobrze zweryfikowaną teorią naukową.

TEORIA NAUKOWA to zestaw stwierdzeń sformułowanych na podstawie pomiarów i eksperymentów, logicznie i spójnie wyjaśniających ich wyniki. Teoria opisuje przyczyny, warunki i przebieg zjawisk, których dotyczy. Jest powiązana z ogółem wiedzy naukowej (innymi teoriami). Jej działanie zostało wielokrotnie przetestowane i potwierdzone.

DEFINICJA
TEORIA
NAUKOWA

Jak każda teoria, również ta podlega weryfikacji. Naukowcy stale starają się ją udoskonalić i znaleźć w niej luki. Całkowite obalenie jej podstawowych elementów (na przykład opisu efektu cieplarnianego czy znaczenia wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych dla bilansu energetycznego Ziemi) jest mało prawdopodobne, bo nie wystarczy do tego obalenie jednego dowodu. Trzeba byłoby obalić wszystkie i w dodatku zaproponować inne wyjaśnienie obserwowanego wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi, zgodne ze wszystkimi innymi teoriami naukowymi. Byłoby to bardzo trudne, bo prawa fizyki, których używamy do opisu klimatu, wykorzystujemy też do wyjaśniania i przewidywania innych zjawisk. Musiałoby się więc okazać, że urządzenia takie jak aparaty cyfrowe, lasery czy reaktory atomowe (i wiele innych) działają tylko w wyniku wielu zbiegów okoliczności, bo skonstruowane zostały w oparciu o nieistniejące prawa.



O tym, jak rodzi się oparty na wiedzy konsensus (na przykład w kwestii przyczyn zmiany klimatu), dowiesz się więcej z filmów na stronie: Zrozumieć kontrowersje wokół zmiany klimatu. Część 1: Konsensus naukowy »

LEKCJA **5**

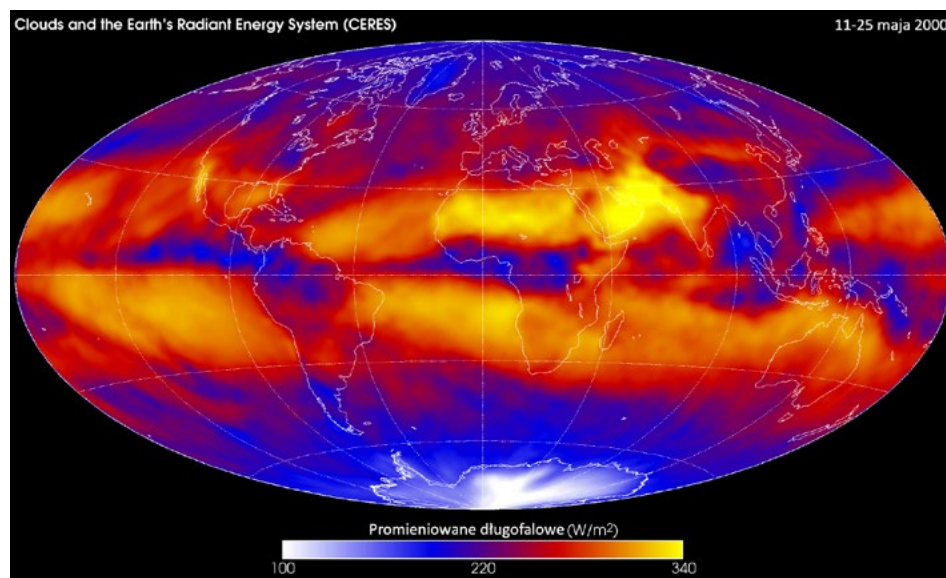
Skąd wiemy, że to wzrost koncentracji gazów cieplarnianych doprowadził do ocieplenia klimatu?

Jest wiele niezależnych, opartych na pomiarach dowodów na to, że to zmiana składu atmosfery spowodowała zmianę bilansu energetycznego Ziemi.

W ziemskim systemie klimatycznym (a także poza nim, na orbitach okołoziemskich) pracuje stale wielu naukowców różnych dziedzin – fizyki, meteorologii, oceanologii, geologii, glaciologii czy biologii – wykorzystujących najrozmaitsze metody pomiarowe. Dysponujemy więc licznymi pomiarami, które dostarczają nam wiedzy o przepływach energii wewnątrz systemu (pomiędzy atmosferą, oceanem, litosferą, kriosferą), a także o dopływie energii słonecznej i ilości energii uciekającej z Ziemi w kosmos. Dzięki temu możemy dość dokładnie opisać bilans energetyczny Ziemi (jeśli chcesz go sobie przypomnieć, zajrzyj do lekcji drugiej) i zidentyfikować, skąd wzięło się jego zaburzenie.

ATMOSFERA EMITUJE MNIEJ ENERGII W KOSMOS

Jak wiesz z lekcji o bilansie energetycznym Ziemi, wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze powinien prowadzić do zmniejszania ilości promieniowania podczerwonego emitowanego z atmosfery w przestrzeń kosmiczną. To zjawisko jest obecnie obserwowane dzięki wykorzystaniu kolejnych satelitów badawczych, krążących po orbicie okołoziemskiej od lat 80. ubiegłego wieku (między innymi w ramach misji ERBS i CERES) (np. Harries i in., 2001, Allan i in., 2014).



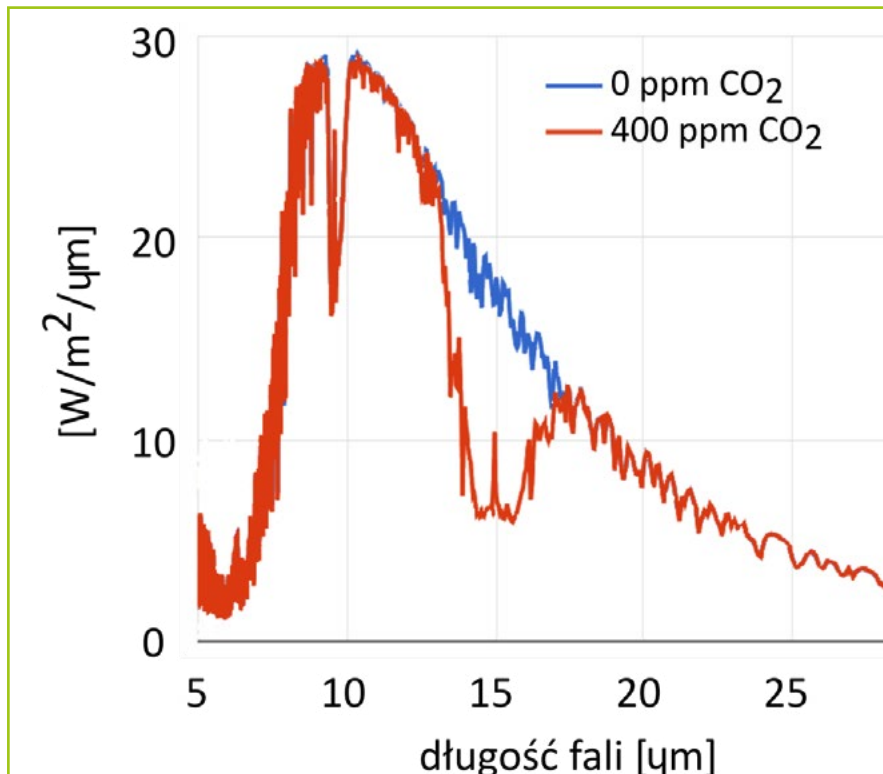
Rysunek 1: Przykład pomiarów promieniowania długofalowego wychodzącego z atmosfery ziemskiej wykonanych przez przyrząd CERES z satelity Terra: średni strumień promieniowania w poszczególnych regionach w dniach 11–25 maja 2000.

Źródło: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio.

strumień promieniowania – ilość energii (w postaci fal elektromagnetycznych) przechodzącej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię

Jak wspomnieliśmy już w lekcji czwartej, każdy gaz cieplarniany pochłania fale o innych długościach. Satelitarne pomiary promieniowania są prowadzone dla różnych długości fali, możemy więc stwierdzić nie tylko, że energia jest zatrzymywana w atmosferze, ale też – jakie związki chemiczne za to odpowiadają. Wyniki pomiarów potwierdzają, że za zaburzenie bilansu energetycznego Ziemi odpowiada wzrost koncentracji dwutlenku węgla, metanu i tlenu azotu(I) oraz pojawienie się w niej freonów i innych stworzonych przez człowieka gazów cieplarnianych (np. Harries i in., 2001, Brindley i Bantges, 2016).

PRZYKŁAD



Rysunek 2: Widmo promieniowania atmosfery, czyli wykres strumienia promieniowania emitowanego przez nią dla różnych długości fal (w mikrometrach).

Linia niebieska odpowiada atmosferze, w której nie byłoby w ogóle dwutlenku węgla, czerwona – atmosferze, w której koncentracja CO_2 wynosi 400 ppm. Jak widzisz, pokrywają się one bardzo dokładnie, z wyjątkiem przedziału długości fal w okolicach $15\mu\text{m}$ (tu w linii czerwonej obserwujemy „dołek”). To właśnie fale tej (i zbliżonych) długości są pochłaniane przez dwutlenek węgla. Pomiary z kolejnych lat pozwalają stwierdzić, dla jakich długości fal w widmie pojawiają się (i poszerzają) „dołki”, a więc jakie związki odpowiadają za zmianę bilansu energetycznego planety.

Wykres nie przedstawia prawdziwych danych pomiarowych. Przygotowano go z użyciem narzędzia dostępnego na stronie Uniwersytetu w Chicago, wykorzystującego model MODTRAN (dla regionu międzyzwrotnikowego i domyślnych ustawień innych parametrów). Zajrzyj na stronę symulatora i samodzielnie sprawdź, jak zmiany koncentracji CO_2 wpływają na kształt widma!

ATMOSFERA EMITUJE WIĘCEJ ENERGII W STRONĘ ZIEMI

Wzrost ilości gazów cieplarnianych w atmosferze powinno skutkować zwiększeniem strumienia promieniowania podczerwonego atmosfery skierowanego w stronę powierzchni Ziemi (zajrzyj do drugiego rozdziału drugiej lekcji). Również występowanie tego efektu jest potwierdzone pomiarami. Feldman i in. (2015) pokazali, że w latach 2000–2010 strumień promieniowania atmosfery mierzony na stacjach na Alasce i w Oklahomie wzrósł o ok. $0,2 \text{ W/m}^2$.

ZMIENIA SIĘ STRUKTURA TERMICZNA ATMOSFERY

Do tej pory, pisząc o atmosferze, koncentrowaliśmy się na zjawiskach zachodzących w jej najniższej warstwie (kilku lub kilkunastu kilometrów). Wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje jednak zmiany także w wyższych jej partiach.

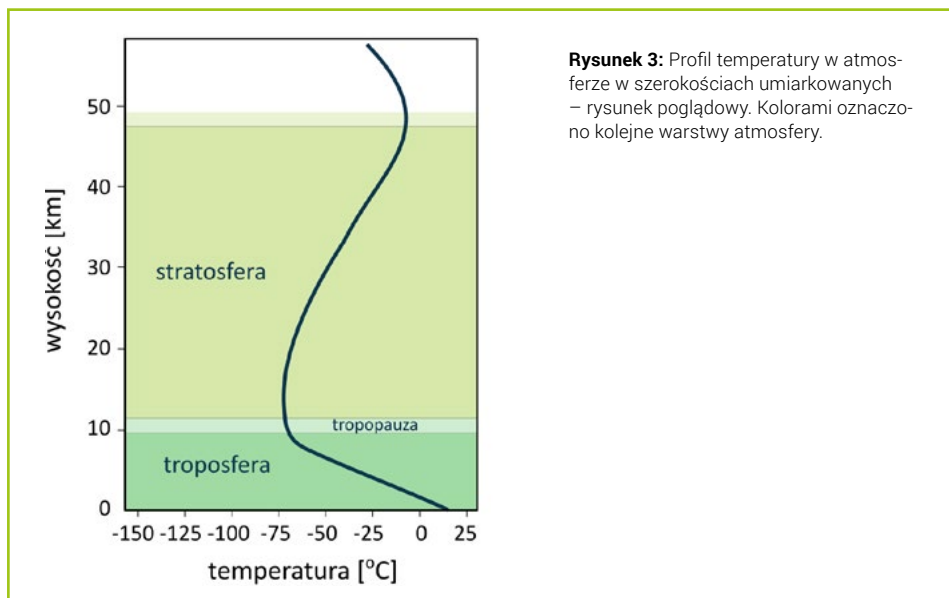


Więcej na ten temat przeczytasz w tekście:

Chcecie dowodów, że CO_2 ma wpływ na efekt cieplarniany? Proszę bardzo! »

Ze względu na to, jak wraz z wysokością zmienia się temperatura powietrza, w atmosferze można wyróżnić:

- troposferę – najniższą warstwę atmosfery, w której (średnio rzecz biorąc) temperatura spada z wysokością (bo im wyżej, tym dalej jesteśmy od źródła ciepła, jakim jest powierzchnia Ziemi),
- stratosferę – warstwę znajdującą się powyżej troposfery (oddziela je „tropopauza”), w której temperatura rośnie z wysokością (to efekt reakcji chemicznych zachodzących w znajdującej się tu warstwie ozonowej, towarzyszy im uwalnianie energii do otoczenia),
- kolejne warstwy.



Rysunek 3: Profil temperatury w atmosferze w szerokościach umiarkowanych – rysunek poglądowy. Kolorami oznaczono kolejne warstwy atmosfery.

CZY WIESZ, ŻE ?

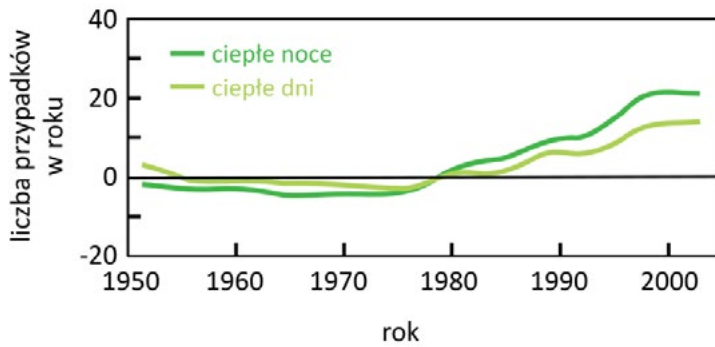
📖 Ochładzanie się górnych warstw atmosfery prowadzi do ich sprężania, a więc zmniejszania ich grubości.

W przypadku gdy zmianę klimatu powoduje wzrost koncentracji gazów cieplarnianych, wzrost średniej temperatury powinien występować w troposferze. W stratosferze tymczasem występować powinno ochłodzenie, ponieważ zwiększona zawartość gazów cieplarnianych przy powierzchni Ziemi silnie osłania wyższe partie atmosfery przed dostępem ogrzewającego je promieniowania ziemskiego. Powinno i występuje – to kolejny efekt potwierdzony pomiarami zdalnymi (satelitarnymi i z powierzchni Ziemi) oraz z użyciem rakiet i balonów meteorologicznych (Ramaswamy i in., 2001, Ramaswamy i in., 2006).

CIĘPŁYCH NOCY PRZYBYWA SZYBCIEJ NIŻ CIĘPŁYCH DNI

Zjawiskiem potwierdzającym, że za zmianę klimatu odpowiada czynnik działający przez całą dobę (tak jak gazy cieplarniane), jest wzrost częstości występowania ciepłych nocy, który jest szybszy niż wzrost częstości występowania ciepłych dni (Alexander i in., 2006, Hartmann i in., 2013). W przypadku ciepłych nocy średni trend w latach 1951–2010 wyniósł 4,3%/10 lat, a w przypadku ciepłych dni ok. 2,9%/10 lat (Hartmann i in., 2013, na podstawie bazy GHCNDEX, Donat i in. 2013).

Zastosowanie średniej bieżącej (inaczej – ruchomej) polega na zastąpieniu każdego punktu danych średnią arytmetyczną z określonego przedziału (np. średnia 11-letnia oznacza, że dla każdego roku liczymy średnią z tego roku, a także pięciu poprzednich i pięciu kolejnych). Powstaje w ten sposób wykres „wygładzony”, na którym łatwiej zauważyć wieloletnie trendy zmian (krótkoterminowe fluktuacje znikają).



Rysunek 4: Zmiany liczby ciepłych dni i nocy w ciągu roku – dane wygładzone przez użycie dziesięcioletniej średniej bieżącej. Punktem odniesienia jest średnia z lat 1961–1990. Ciepły dzień to dzień, w ciągu którego temperatura maksymalna należała do 10% najwyższych temperatur dla tego dnia w roku w latach 1961–1990. Ciepła noc to noc, w ciągu której temperatura minimalna należała do 10% najniższych (dla tego dnia w roku) w latach 1961–1990.

Ilustracja na podstawie Alexander i in., (2006).

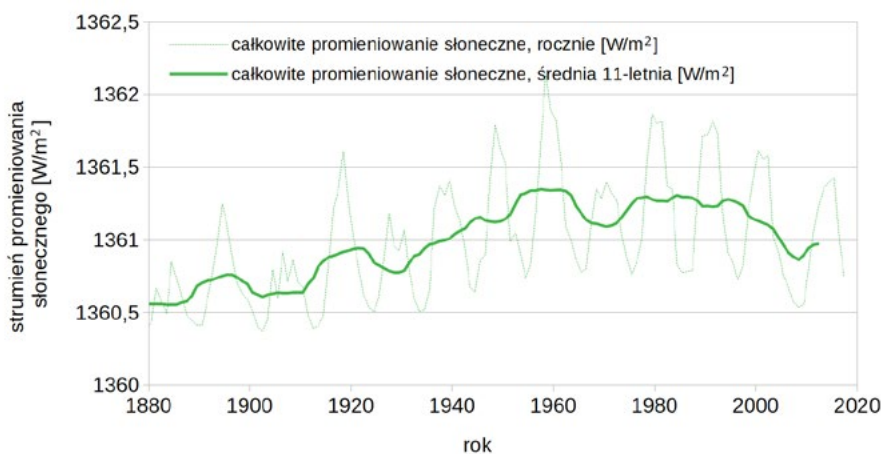
AKTYWNOŚĆ SŁONECZNA NIE ROŚNIE

Jak wiesz z lekcji drugiej, ocieplenie klimatu mogłoby być spowodowane wzrostem ilości energii docierającej do Ziemi ze Słońca. Pomiary prowadzone z użyciem satelitów wskazują jednak, że taki efekt obecnie nie występuje (Kopp i Lean, 2011), podczas gdy wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi trwa. Między rokiem 1750 a 2011 wkład czynników związanych z działalnością człowieka w ocieplenie klimatu był ok. 46 razy większy niż zmian aktywności słonecznej (IPCC, 2013).



O historycznych wartościach aktywności słonecznej więcej przeczytasz w tekście:

Aktywność słoneczna w ostatnich 9000 lat »



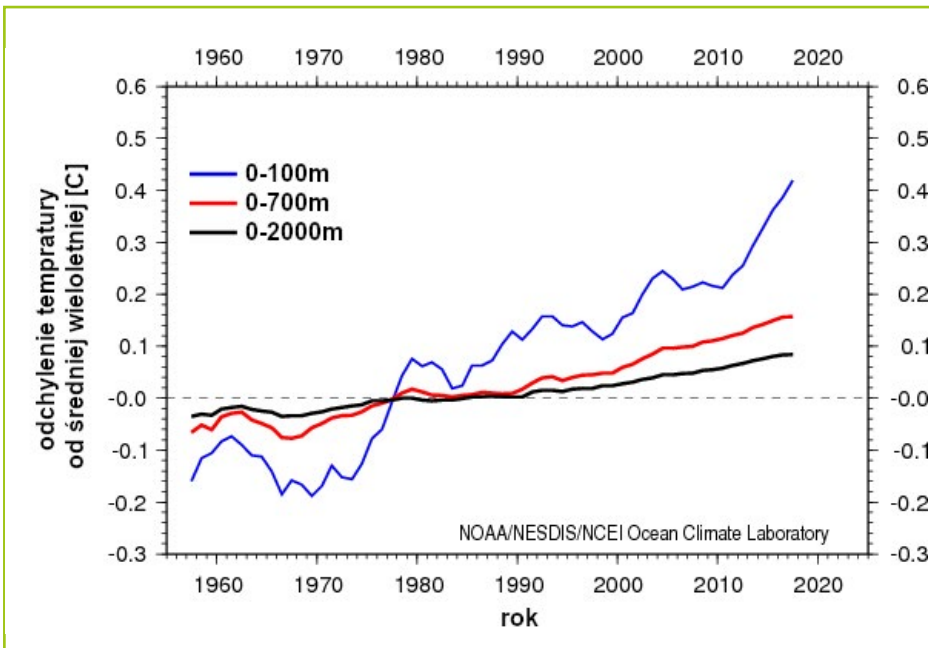
Rysunek 5: Strumień promieniowania słonecznego docierającego do górnej granicy atmosfery. Dane przygotowane przez Grega Koppa (do roku 1978 za Dudok de Wit i in., 2017 i Wu i in., 2018, najnowsze z pomiarów satelitarnych, patrz Kopp i Lean, 2011). Cienka linia przedstawia średnie roczne, a gruba dane wygładzone poprzez zastosowanie 11-letniej średniej bieżącej. Jak widzisz, aktywność słoneczna podlega fluktuacjom w cyklach ok. 11-letnich. Wygładzenie wykresu pozwala łatwiej zauważyć, jak aktywność zmienia się z cyklu na cykl.

OGRZEWA SIĘ OCEAN

Wzrost średniej temperatury atmosfery mógłby być powodowany także przepływami energii wewnątrz ziemskiego systemu klimatycznego – na przykład uwalnianiem ciepła z oceanu. W takim przypadku jednak średnia temperatura samego oceanu (pozbywającego się energii) powinna spadać, tymczasem prowadzone na całym świecie pomiary temperatury wody wskazują, że również ocean się ogrzewa (Levitus i in., 2012, IPCC, 2013) – patrz rysunek na następnej stronie. Musi więc istnieć inne źródło energii.

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 W światowym oceanie unosi się obecnie ok. 4000 autonomicznych boi nurkujących, mierzących temperaturę i zasolenie wody na różnych głębokościach. To instrumenty wypuszczone w ramach międzynarodowego programu Argo.



Więcej o pomiarach temperatury oceanu przeczytasz w tekstach

Jak i po co mierzymy temperaturę oceanu? »

oraz

Program Argo sięga głęboko. »

Rysunek 6: Odchylenie średnich temperatur w powierzchniowej warstwie oceanu (do głębokości 100, 700 i 2000 m) od średniej z lat 1955–2006. Dane wygładzone przez zastosowanie pięcioletniej średniej bieżącej.

Źródło: NOAA/NESDIS/NCEI Ocean Climate Laboratory.

PODSUMOWANIE

Jak wiesz z poprzednich lekcji, zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze rośnie. Wszystkie wymienione wyżej obserwowane współcześnie zjawiska wskazują, że właśnie to jest przyczyną obserwowanego obecnie wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi. Gdyby ocieplenie było wynikiem działania innego czynnika (np. zmian aktywności słonecznej lub przepływów energii wewnątrz systemu klimatycznego), nie umielibyśmy ich wyjaśnić.

Własności gazów cieplarnianych, gdy chodzi o oddziaływanie z promieniowaniem podczerwonym, zostały potwierdzone doświadczeniami laboratoryjnymi już w XIX wieku (Tyndall, 1872). Jest niezwykle mało prawdopodobne, by istniał nieznany czynnik zmieniający klimat Ziemi, który jednocześnie:

- powodowałby dokładnie te same zjawiska (przewidziane na podstawie praw fizyki), jakie powinien powodować wzrost koncentracji gazów cieplarnianych,
- znosiłby wpływ obserwowanego wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych.

ZAPAMIĘTAJ!

Naukowcy umieją określić mechanizm, dzięki któremu wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje ocieplenie klimatu. Zjawiska towarzyszące obserwowanej współcześnie zmianie klimatu potwierdzają, że właśnie z tym mechanizmem – nasilaniem się efektu cieplarnianego – mamy obecnie do czynienia.



W kolejnym rozdziale przeczytasz o dowodach na to, że współczesny wzrost koncentracji gazów cieplarnianych jest spowodowany działalnością człowieka.

Skąd wiemy, że to działalność człowieka doprowadziła do wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze?

Jest wiele niezależnych, opartych na pomiarach dowodów na to, że to działalność człowieka spowodowała wzrost koncentracji gazów cieplarnianych (głównie dwutlenku węgla) w atmosferze.

Z poprzedniej lekcji wiesz już, jakie działania człowieka prowadzą do emisji gazów cieplarnianych. Ale skąd mamy pewność, że to właśnie one (a nie jakieś naturalne zjawiska) spowodowały wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze? Odpowiadamy, koncentrując się na dwutlenku węgla, który w największym stopniu odpowiada za obserwowane ostatnio ocieplanie się klimatu.

KORELACJA CZASOWA

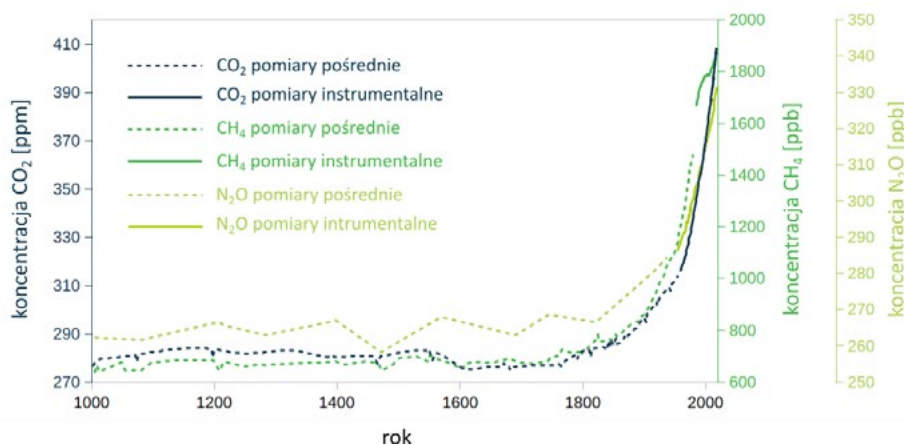
Pomiary koncentracji gazów cieplarnianych (dla najnowszych czasów – instrumentalne, dla dawniejszych – pośrednie) wskazują, że zaczęły one rosnąć w epoce przemysłowej. Wcześniej, przez przynajmniej 800 000 lat, wahały się w zakresie 140–300 ppm w rytmie zmieniających się epok lodowych i interglacjałów (Masson-Delmotte i in., 2013). Potwierdza to możliwy związek nasilania się efektu cieplarnianego z rozwojem przemysłu i rolnictwa.

Więcej na temat cykli epok lodowych i interglacjałów przeczytasz w artykule:

Klimat: przeszłość, teraźniejszość, przyszłość »

Informacje o parametrach systemu klimatycznego Ziemi takich jak temperatura, skład atmosfery, poziom morza i in., w czasach, dla których nie mamy pomiarów instrumentalnych, czerpiemy z danych pośrednich – próbek geologicznych, glaciologicznych, dendrologicznych i in.

Więcej na ten temat przeczytasz w cyklu na temat paleoklimatologii na stronie **Nauka o klimacie**. »

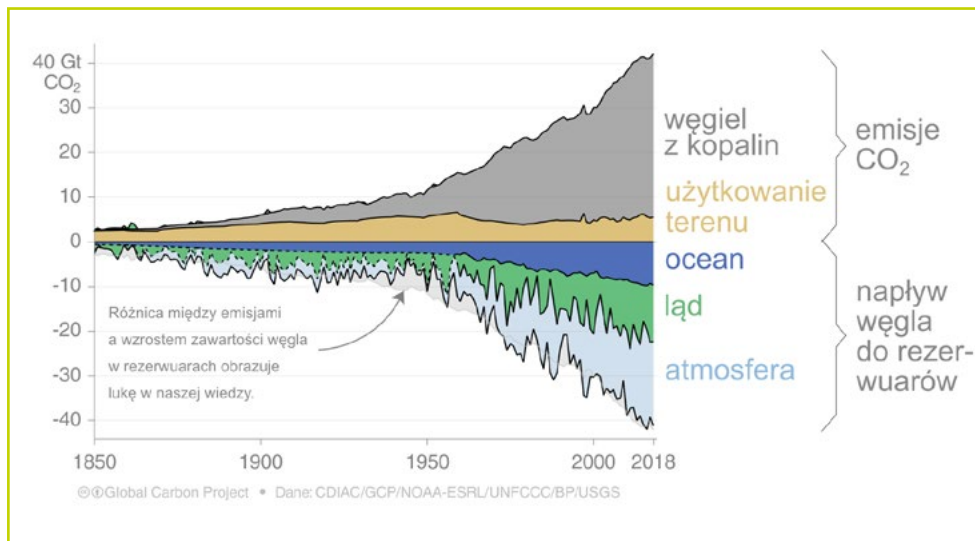


Rysunek 7: Wyniki pośrednich i instrumentalnych pomiarów koncentracji gazów cieplarnianych (CO_2 , CH_4 i N_2O) w atmosferze. Każdemu gazowi odpowiada inna oś pionowa, oznaczona kolorem.

Dane skompilowane przez EPA (2016) oraz WMO (2017, 2018, 2019).

WIEMY, ILE EMITUJEMY I CO SIĘ Z TYM DZIEJE

Jak wiesz z poprzednich lekcji, wiele działań człowieka skutkuje emisjami gazów cieplarnianych, a gazem, który w największym stopniu odpowiada za współczesne ocieplanie się klimatu, jest dwutlenek węgla. W jego przypadku dość dokładnie znamy wartości rocznych emisji związanych z działalnością człowieka. Większość z nich pochodzi ze spalania paliw kopalnych, a więc do ich oszacowania wystarczy znać statystyki zużycia węgla, ropy i gazu. Podsumowania emisji CO₂ przygotowuje co roku między innymi międzynarodowy Global Carbon Project (np. Friedlingstein i in., 2019). Wartości emisji można zestawiać z potwierdzonymi pomiarami wzrostami zawartości węgla w jego rezerwuarach – atmosferze (Keeling, 1976, Długokencky i Tans, 2020), oceanie (Ciais i in., 2013, Bakker i in., 2016) i ekosystemach lądowych (Jia i in., 2019). Obserwujemy, że w zakresie niepewności pomiarowej zaburzenia pojawiające się w obiegu węgla w przyrodzie są spójne z naszymi emisjami (Ciais i in., 2013, Friedlingstein i in., 2019).



CZY WIESZ, ŻE ?

Dwutlenek węgla jest w atmosferze gazem „dobrze wymieszanym” – to znaczy, że jego koncentracje są na całym świecie i na różnych wysokościach bardzo zbliżone. Ułatwia to badanie średniej koncentracji CO₂ (i całkowitej zawartości węgla) w atmosferze.

Rysunek 8: Zestawienie emisji dwutlenku węgla przez człowieka (powyżej zera) z napływem węgla do jego rezerwuarów – atmosfery, ekosystemów lądowych, oceanu (poniżej zera). Pod hasłem „węgiel z kopalni” kryje się wydobycie i użycie paliw kopalnych oraz produkcja cementu.

Źródło: Global Carbon Project, (2019).

UBYWA TLENU

Równoległe ze wzrostem koncentracji dwutlenku węgla w powietrzu obserwujemy spadek koncentracji tlenu. Jest on bardzo niewielki, jednak zachodzi konsekwentnie i dowodzi, że wzrost zawartości CO₂ w atmosferze jest efektem reakcji spalania (łączenia atomów węgla z atomami tlenu) (Manning i Keeling, 2006, Ciais i in., 2013).

Wyniki stężenia tlenu w atmosferze znajdziesz na przykład na stronie **Scripps O₂ Program** »

SKŁAD IZOTOPOWY WĘGLA W ATMOSFERZE

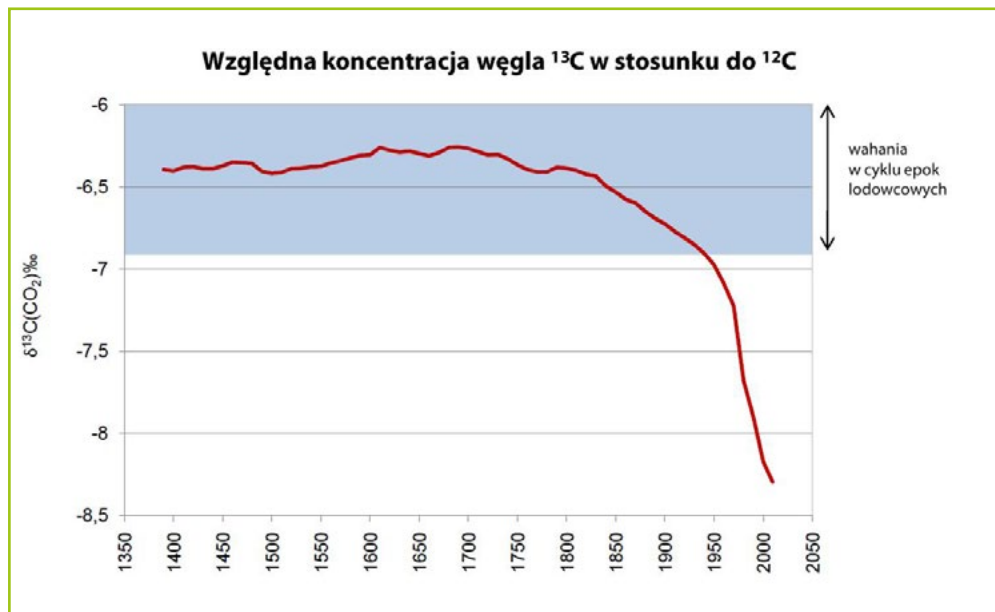
IZOTOPY

Atomy tego samego pierwiastka (na przykład węgla) mają określoną liczbę protonów w jądrze i elektronów na powłokach (w przypadku węgla – po 6).

W jądrze atomu znajdują się jednak także neutrony – cząstki neutralne elektrycznie, ale mające masę zbliżoną do protonu. Liczba neutronów niekoniecznie jest równa liczbie protonów. Atomy różniące się tylko liczbą protonów to różne izotopy tego samego pierwiastka. Na przykład węgiel powszechnie występuje w postaci z 6 neutronami (¹²C, gdzie „12” oznacza masę jądra w jednostkach masy atomowej, czyli 12u), 7 neutronami (¹³C), 8 neutronami (¹⁴C).

Węgiel na Ziemi występuje najczęściej w izotopach ^{12}C (lżejszych) oraz ^{13}C (cięższych). Masa atomów może wpływać na prawdopodobieństwo, z jakim biorą udział w niektórych różnych reakcjach i procesach. Przykładem jest fotosynteza – większość roślin „preferuje” lżejsze atomy węgla ^{12}C (czyli mając „do wyboru” cząsteczkę CO_2 z ^{12}C , pochłonie ją z większym prawdopodobieństwem niż taką z ^{13}C). W efekcie udział lżejszych izotopów węgla jest w organizmach żywych wyższy niż w atmosferze, a także oceanie i gazach wulkanicznych.

Jak wiesz z lekcji trzeciej, paliwa kopalne powstały z pozostałości żywych organizmów. To oznacza, że również w ich składzie udział ^{12}C jest podwyższony. Jeśli wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze jest efektem spalania paliw kopalnych, to udział lekkiego izotopu węgla w atmosferycznym CO_2 powinien rosnąć. Pomiary pokazują, że tak jest w istocie. Jak możesz zobaczyć na wykresie poniżej, epoka przemysłowa przyniosła zdecydowaną zmianę we względnej zawartości ^{13}C i ^{12}C , a jak możesz sprawdzić na stronie Scripps CO_2 Program, trend wzrostu zawartości lekkiego izotopu węgla w atmosferze jest kontynuowany.



Rysunek 9: Względna koncentracja węgla ^{13}C w stosunku do ^{12}C – spadek wskaźnika $\delta^{13}\text{C}$ oznacza wzrost udziału ^{12}C w całości węgla znajdującego się w atmosferze. Niebieski pas wskazuje zakres wahań wskaźnika w czasach epok lodowych i interglacjałów (ostatnie setki tysięcy lat).

Źródło: Popkiewicz (2013), dane za Böhm i in., (2002) oraz Scripps CO_2 Program.

TO NIE WULKANY, OCEANY ANI EKOSYSTEMY LĄDOWE

Jak wiesz z lekcji o cyklu węglowym, w naturze występują naturalne źródła dwutlenku węgla. Pomiary wskazują jednak, że to nie one są źródłem wzrostu koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze.

TO NIE WULKANY.

Wyniki pomiarów pokazują, że obecnie roczne emisje dwutlenku węgla związane z wulkanizmem (ok. 0,3 mld ton CO_2) są ponad 100 razy mniejsze niż emisje antropogeniczne (Gerlach, 2011, Burton i in., 2013).



O tym, jak mierzy się wulkaniczne emisje dwutlenku węgla, przeczytasz w tekście CO_2 z wulkanów – jak to się mierzy? »

TO NIE OCEAN.

Gdyby to ocean był źródłem CO₂ dla atmosfery, to ilość zgromadzonego w nim węgla powinna spadać w miarę oddawania go do atmosfery. Taki efekt nie jest jednak obecnie obserwowany. Przeciwnie, pomiary wskazują na to, że ilość dwutlenku węgla rozpuszczonego w oceanie rośnie, czemu towarzyszy zjawisko zakwaszania oceanów (Ciais i in., 2013, WMO, 2019).



Na temat skutków i dalszych perspektyw pochłaniania dwutlenku węgla przez oceany przeczytasz w tekstach:

- Oceany będą pochłaniały coraz mniej dwutlenku węgla »
- Mit: Zakwaszanie oceanu nie szkodzi morskim stworzeniom »
- Mit: Wzrost emisji CO₂ nie ma wpływu na oceany »

TO NIE EKOSYSTEMY LĄDOWE.

Jak wiesz, emisje dwutlenku węgla i metanu mogą mieć źródło także w ekosystemach, które przebudowują się także bez bezpośredniego wpływu człowieka (susze, pożary, szkodniki i in. mogą powodować obumieranie roślin). Spodziewamy się, że w przyszłości ekosystemy lądowe pochłaniać będą coraz mniej dwutlenku węgla, a niektóre będą stawać się (lub już się stają) jego źródłami. Jednak globalnie rzecz biorąc, wciąż jeszcze mamy do czynienia z magazynowaniem węgla w ekosystemach (Zhu i in., 2016, Shukla i in., 2019).



Na temat emisji i pochłaniania CO₂ przez ekosystemy lądowe przeczytasz między innymi w tekstach:

- Ziemia się zieleni – ale gdzie i dlaczego? »
- Nawożenie roślin CO₂ jest OK. Są jednak „ale”. Liczne „ale”. »
- Pożary i zmiana klimatu – „to skomplikowane” »
- Groźne sprzężenie zwrotne: ocieplenie zubaża gleby, ich węgiel trafia do atmosfery »

PODSUMOWANIE

Wyniki różnorodnych pomiarów potwierdzają, że wzrost koncentracji gazów cieplarnianych (przede wszystkim dwutlenku węgla) w atmosferze jest spowodowany działalnością człowieka. Jest niezwykle mało prawdopodobne, by istniało nieznane dotąd źródło dwutlenku węgla, zbiegiem okoliczności emitujące go dokładnie tyle, ile powinno być emitowane w efekcie spalania paliw kopalnych, a jednocześnie – likwidujące w jakiś sposób CO₂ uwalniany przez człowieka.

Mity klimatyczne

Nieprawdziwe komunikaty na temat zmiany klimatu często opierają się na błędach logicznych.

Obecny stan wiedzy naukowej i wynikający z niego powszechny konsensus dotyczący zachodzenia zmiany klimatu sprawiają, że podważanie merytorycznych podstaw tej wiedzy nie ma już sensu. Jednak istniały przez długi czas i istnieją nadal osoby i grupy zainteresowane szerzeniem opinii sprzecznych z wiedzą naukową. O tym, czym jest negacjonizm klimatyczny, jaką ma historię i skąd się wzięła tak zwana „maszyna zaprzeczania”, przeczytasz szczegółowo w kolejnej lekcji.

Obecność dużej ilości dezinformacji jest częstym współczesnym problemem w internecie i różnego rodzaju mediach. Skutkuje ona istnieniem szeregu bardzo rozpowszechnionych mitów na temat zmiany klimatu, które ludzie mogą powtarzać, często w dobrej wierze. Ich rozbudowaną listę (jest na niej ponad 100 różnych mitów) wraz z wyjaśnieniami możesz znaleźć na stronie: [„Nauka o klimacie: Fakty i mity”](#). Z tej części lekcji możesz dowiedzieć się, jakie są najczęstsze błędy logiczne obecne w takich mitach oraz jakie strategie siania wątpliwości wykorzystuje się przy ich tworzeniu.

BŁĘDY LOGICZNE W MITACH O KLIMACIE:

Niepełne przesłanki i nieuprawnione wnioski.

Mity klimatyczne często bazują na podaniu kilku prawdziwych informacji, a następnie **wyciągnięciu z prawdziwych przesłanek fałszywych logicznie wniosków**. Zgodnie z zasadą, że ziarno prawdy uprawdopodobnia fałsz. Przykładowo z przesłanki, że w przeszłości klimat zmieniał się z przyczyn naturalnych (prawda), nie wynika, że obecna zmiana jest pochodzenia naturalnego (fałsz).

Dodatkowo te rozumowania omijają kluczowe szczegóły jak skale czasowe lub zasięg geograficzny zjawisk. Przykładowo można spotkać się z opinią, że skoro kiedyś przyroda i świat „radziły sobie” ze zmianą klimatu, to także teraz nie ma co się martwić.

Przesłanka – zdanie, które w rozumowaniu logicznym uznaje się za punkt wyjścia wnioskowania.

- Po pierwsze, jednak nie we wszystkich przypadkach można powiedzieć, że przyroda wyszła ze zmian klimatu bez szwanku. Przykładowo na przełomie permu i triasu (ok. 252 mln lat temu) zmiana klimatu wywołana trwającą tysiące lat aktywnością wulkaniczną doprowadziła do wyginięcia ponad 90% gatunków morskich i 75% lądowych (więcej na ten temat przeczytasz w artykule Klimat dawnych epok: wielkie wymierania).
- Po drugie, prehistoryczne zmiany klimatu rozgrywały się w dużo dłuższych skalach czasowych – na przykład wyjście Ziemi z ostatniej epoki lodowej oznaczało wzrost średniej temperatury o 3–3,5 stopnia w ciągu ok. 8 tysięcy lat (Shakun, 2012), co dawało funkcjonującym na Ziemi gatunkom dużo więcej czasu na migrację itp. Obecnie musimy liczyć się z taką zmianą w ciągu 100–200 lat.
- Po trzecie, niektóre zjawiska z przeszłości, które przywoływane są w takich porównaniach, nie miały bynajmniej zasięgu globalnego (na przykład często wspomniany wzrost temperatur w średniowieczu dotyczył Północnego Atlantyku, południa Grenlandii, Arktyki Eurazjatyckiej i części Ameryki Północnej, w wielu innych regionach temperatury były obniżone i globalna średnia temperatura była niższa niż dziś (Mann i in., 2009).

Jak widać z powyższego przykładu, w tego typu rozumowaniach występować może nawet kilka różnych błędów logicznych, w tym wnioskowanie z niepełnej informacji, porównywanie zjawisk o różnych rozmiarach i skalach oraz nieuprawnione wnioskowanie przez analogię. Wnioski z takich rozumowań są zatem nieuprawnione logicznie. Niestety są też bardzo perswazyjne, zwłaszcza jeśli służą potwierdzaniu światopoglądu, który ktoś już wcześniej posiadał, czy uspokajaniu.

Nieprawdziwe przesłanki.

Czasami pojawiają się także zwyczajnie nieprawdziwe przesłanki. Bazują one na tym, że większość osób nie ma czasu lub nie wie, w jaki sposób mogłaby sprawdzić te informacje. Przykładowo można spotkać się z mitem mówiącym, że antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych nie mają znaczenia dla klimatu, ponieważ wulkany emitują więcej dwutlenku węgla niż człowiek. Tymczasem jest to zwyczajnie nieprawda: w rzeczywistości ludzie emitują w ciągu roku ponad 100 razy więcej CO₂ niż wszystkie wulkany świata.

Wybieranie wisienek.

Technika wybierania wisienek polega na wybieraniu tylko małego wycinka informacji na dany temat – takiego, który stanowi najlepsze poparcie dla promowanej tezy, a omijaniu całej reszty. Może to polegać na przykład na podkreślaniu, że wybrany lodowiec rośnie i pomijaniu faktu, że średnio rzecz biorąc lodowce świata tracą masę.

Przedstawianie fałszywej dychotomii.

Większość mechanizmów zmiany klimatu jest złożona. Fałszywa dychotomia polega na przeciwstawianiu sobie zjawisk, które się nie wykluczają, oraz upraszczaniu złożoności. Przykładowo z faktu, że Słońce wpływa na klimat nie wynika, że człowiek na niego nie wpływa.



Więcej informacji:

Mit: wulkany emitują więcej dwutlenku węgla niż człowiek »

Promowanie fałszywych ekspertów.

Negacjoniści klimatyczni celowo wyszukują i nagłaśniają wypowiedzi sprzeczne z konsensusem naukowym. Wielokrotne przytaczanie opinii przeciwnych do konsensusu sprawia, że w końcu zaczynają być one odbierane jako równie ważne i rozpowszechnione, co fakty wywodzące się ze środowiska naukowego.

Stawianie nierealistycznych wymagań naukowcom.

Istotą podejścia naukowego jest precyzja, stąd często wyniki badań naukowych, zwłaszcza opartych na modelowaniu, podawane są z odpowiednim zakresem niepewności, a wyniki pomiarów są podawane w taki sposób, że uwzględniają potencjalny błąd pomiaru. Wymaganie stuprocentowej pewności co do liczb w wynikach badań naukowych wynika z niezrozumienia ich natury.

Wiara w teorie spiskowe.

Rozdźwięk między konsensusem naukowym a opiniami wygłaszanymi przez negacjonistów może doprowadzić do tego, że ci ostatni stwierdzają istnienie wszechobecnego spisku. Udział w nim przypisują nie tylko środowisku naukowemu, ale także politykom czy instytucjom państwowym i międzynarodowym.



Cenne uwagi na temat odróżnienia nauki od pseudonauki znajdziesz w pierwszym rozdziale Stanowiska Komitetu Etyki w Nauce Polskiej Akademii Nauk na temat „Etycznych aspektów upowszechniania poglądów nienaukowych” z 24.02.2020. »





KLIMATYCZNE ABC

MAGDALENA BUDZISZEWSKA
ALEKSANDRA ŚWIDERSKA
ADRIAN WÓJCIK

Co powstrzyma nas przed przeciwdziałaniem zmianie klimatu?

Ludzka psychologia, skłonność do akceptowania faktów lub zaprzeczania im, zbiorowe zachowania i rządzące nimi mechanizmy stanowią ważny i często niedoceniany element decydujący o reakcji na zmianę klimatu. Zagadnienia te są przedmiotem zainteresowania psychologii społecznej. Z lekcji siódmej dowiesz się, jakie mechanizmy mogą stać za zaprzeczaniem faktom naukowym związanym ze zmianą klimatu, jak kształtują się postawy wobec zmiany klimatu w Polsce i na świecie, a także jakie postawy i paradoksy wiążą się z zachowaniami prośrodowiskowymi ludzi oraz dlaczego zachowania na poziomie indywidualnym to nie wszystko.

LEKCJA **6**

Zaprzeczanie zmianom klimatu. Jak to wyjaśnić?

Co to jest denializm klimatyczny?

Skąd się wziął? Jakie są jego rodzaje?

WPROWADZENIE - NAJWAŻNIEJSZE POJĘCIA

Stanowisko, które zaprzecza konsensusowi naukowemu w sprawie zmiany klimatu, to **denializm klimatyczny** (od angielskiego słowa *denial*), nazywany także **negacjonizmem**. Należy przy tym zaznaczyć, że określanie kogoś mianem denialisty lub negacjonisty nie powinno mieć pejoratywnego wydźwięku. Słowa te są używane opisowo jako związane terminy ugruntowane w literaturze naukowej i publicystycznej (NCSE, 2016), jak też preferowane przez samych denialistów.

Na przestrzeni lat denializm skupiał się na trzech różnych kwestiach:

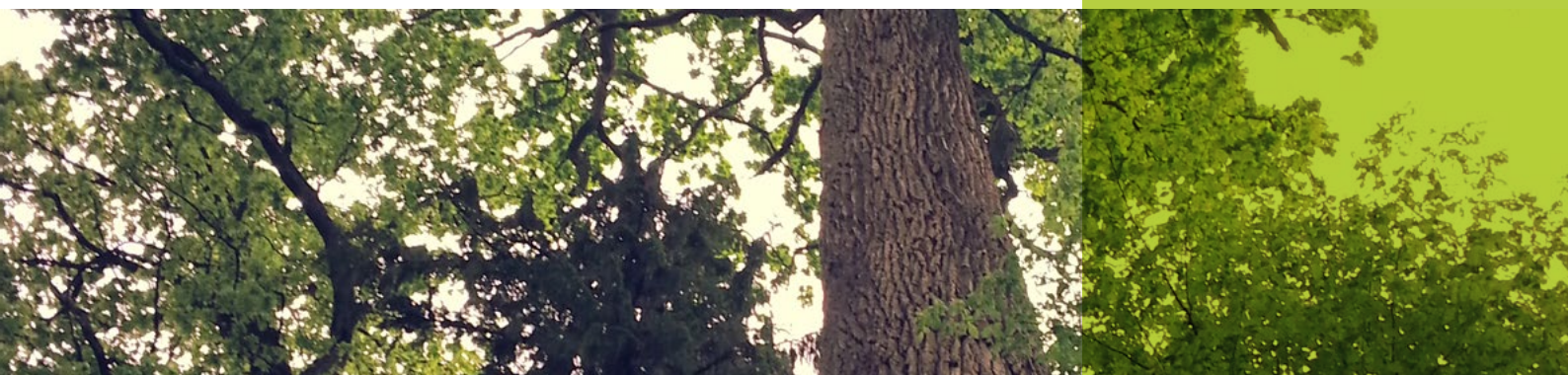
- istnieniu zjawiska globalnego ocieplenia,
- antropogenicznych przyczynach globalnego ocieplenia,
- powadze problemu, jakim jest globalne ocieplenie.

Zależało to od stanu wiedzy naukowej i ogólnego kontekstu społeczno-politycznego w danym czasie (Dunlap & McCright, 2010). Reakcje na wymienione kwestie mogą przybierać trzy główne formy:

- **dosłownego zaprzeczania** (*literal denial*), czy innymi słowy utrzymywania, że dane zjawisko w rzeczywistości nie ma miejsca,
- **interpretacyjnego zaprzeczania** (*interpretive denial*), czyli przyjmowania faktów do wiadomości, ale nadawania im innego znaczenia,
- **implikacyjnego zaprzeczania** (*implicatory denial*), czyli dopuszczania zachodzenia danego zjawiska przy zaprzeczaniu, że ma lub nie będzie miało ono wpływu na jakąś osobę albo że osoba ta może cokolwiek zrobić w związku z tym zjawiskiem (Cohen, 2001).



Definicja denializmu
po angielsku »



Zadanie do zastanowienia się

Przeczytaj wypowiedź znalezionej w Internecie (pisownia oryginalna):

„To co teraz obserwujemy w Australii jest skutkiem nie ludzi, lecz zmiany ruchu obiegowego ziemi z bardziej przypominającego okrąg, w ten bardziej przypominający elipsę dzięki czemu znajduje się coraz bliżej słońca. Jeżeli chodzi o wytwarzanie CO₂ przez ludzi, to ma to bardzo znikomy wpływ na ocieplenie klimatu, dowodem na to są wykresy pokazywane nawet przez ekologów mających nadzieję że nikt nie zauważy ich 'nieprawidłowości', na których wyraźnie widać, że zawsze najpierw podnosi się temperatura, a dopiero później zwiększa się stężenie CO₂”

Jaki rodzaj zaprzeczania prezentuje ta osoba?

Innym terminem szeroko używanym w literaturze jest sceptycyzm klimatyczny. Sceptycyzm był dominującą postawą wśród naukowców wtedy, gdy dostępne dowody na postępujące ocieplenie klimatu były niekompletne i proces ich gromadzenia dopiero się zaczynał, czyli na przełomie XIX i XX wieku (Weart, 2015). Dziś dopuszcza się, że denializm i sceptycyzm mogą stanowić pewne kontinuum, od całkowitego zaprzeczania na jednym końcu do uogólnionego powątpiewania na drugim (Dunlap, 2013; Hobson & Niemeyer, 2012). Według niektórych autorów za sceptycyzm może uchodzić zaprzeczanie interpretacyjne i implikacyjne, kiedy to ludzie posiadają wiedzę na temat zmian klimatu, ale uzasadniają te zmiany przyczynami naturalnymi i nie widzą ich jako procesu, który można kształtować własnymi działaniami – takie postawy w populacji cieszą się dużym zainteresowaniem badaczy w dziedzinie nauk społecznych (np. Hobson & Niemeyer, 2012; Norgaard, 2006).

JAK TO SIĘ ZACZĘŁO? TŁO SPOŁECZNO-POLITYCZNE

Od połowy XX wieku w bogatych krajach zachodnich dominował określony paradygmat społeczny – kładziono nacisk na indywidualizm, prawa jednostki, własność prywatną, przedsiębiorczość oraz ograniczanie wpływu władzy na te sfery. To, wraz z szybkim rozwojem nauki i nowych technologii, miało umożliwić niemal nieograniczony wzrost gospodarczy. Najbardziej charakterystycznym przykładem takiego kraju są Stany Zjednoczone.

W latach 60. paradygmat ten zaczął być krytykowany przez progresywne ruchy prośrodowiskowe. Zwrały one uwagę na negatywne skutki wzrostu ekonomicznego, przede wszystkim na degradację środowiska naturalnego. Dążyły do wprowadzenia ogólnych regulacji dla przemysłu, mających na celu ograniczenie skali zniszczeń i ochronę w dalszej perspektywie. Cieszyły się dużym poparciem społecznym i odniosły wiele sukcesów – powołano na przykład amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (US Environmental Protection Agency).

Na początku lat 80., wraz z wyborem Ronalda Reagana na prezydenta USA, nastąpiło odrodzenie ruchów konserwatywnych. Były one przeciwne działaniom ruchów prośrodowiskowych, szczególnie ograniczeniom narzucanym przedsiębiorcom. Otwarte próby osłabienia wpływów progresywnych spotkały się jednak z dużym społecznym oporem. Wtedy konserwatyści skoncentrowali swe wysiłki na podważaniu naukowych podstaw współczesnych zagrożeń dla środowiska.

NAJWAŻNIEJSZE ELEMENTY „MASZINY ZAPRZECZANIA” ZMIANOM KLIMATU

Przemysł paliw kopalnych i pokrewne korporacje. Jak Ci już wiadomo z lekcji 3, spalanie paliw kopalnych jest głównym źródłem produkcji gazów cieplarnianych. Nic więc dziwnego, że przemysły węglowy i naftowy od początku grały nadrzędną rolę w „maszynie zaprzeczania” (Dunlap & McCright, 2010, 2011) zmianom klimatu. Działyły też na rzecz uniemożliwienia władzom wprowadzenia regulacji dotyczących kontroli emisji dwutlenku węgla. Z czasem przyłączyły się do nich inne korporacje i stowarzyszenia związane z przemysłem energetycznym, wydobywczym i produkcją, np. samochodów. Wszystkie razem mają wkład finansowy w „maszynę zaprzeczania” – sponsorują konserwatywne think-tanki i opozycyjnych naukowców, a także wspierają ataki na naukowców po stronie konsensusu i Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change).

Konserwatywne think-tanki. Sponsorowane przez przemysł, konserwatywnych filantropów i fundacje konserwatywne think-tanki zapewniają tło ideologiczne dla „maszyny zaprzeczania” (Dunlap & McCright, 2011). Ich wpływy są dodatkowo wzmacniane przez to, że niektórzy z ich fundatorów są związani ze światem nauki, np. z fizyką (przypadek Instytutu Marshalla). Think-tanki stanowią zaplecze instytucjonalne dla opozycyjnych naukowców, organizują konferencje i „warsztaty edukacyjne” dla polityków oraz wytwarzają i rozpowszechniają różnorodne materiały podważające konsensus w mediach (raporty, notki i konferencje prasowe, nagrania, wywiady).

Opozycyjni naukowcy. Naukowcy, którzy prezentują poglądy niezgodne z konsensem naukowym, są powiązani z przemysłem, przychylnymi im politykami i konserwatywnymi think-tankami. Niektórzy z opozycyjnych naukowców faktycznie zajmują się zmianami klimatu (np. Richard Lindzen), część pracuje w innych dziedzinach nauki, ale reszta ma niewiele wspólnego z pracą badawczą. Choć ogólnie nie ma ich wielu, to aktywność opozycyjnych naukowców jest bardzo wartościowa dla think-tanków, na przykład jeśli chodzi o wykłady i publikacje. Jednak liczba ich publikacji i cytowań w recenzowanych czasopiśmie jest znacznie niższa w porównaniu do naukowców po stronie konsensusu (Anderegg i in., 2009).

GLÓWNE STRATEGIE

Stwarzanie niepewności. Proces ten rozpoczął przemysł paliw kopalnych, do którego następnie dołączyły ruchy konserwatywne, politycy i media – ci wszyscy aktorzy w dużym stopniu polegali na opozycyjnych naukowcach. Jeden z tych naukowców (Frank Luntz) przygotował raport, który dotarł do szerokiej publiczności. Podkreślał w nim, że debata naukowa na temat zmian klimatu nadal trwa i nie przynosi jednoznacznych wniosków. Wzywał do czekania, aż zgromadzi się więcej faktów i zachęcał do stawiania więcej pytań naukowcom. Co więcej, dotychczasowe badania potwierdzające zmiany klimatu przedstawiano jako „śmieciową naukę” (junk science), a ich krytykę – jako prawdziwą naukę. Czasami oferowano inne wyjaśnienia globalnego ocieplenia, np. aktywność słońca. Towarzyszyły temu ataki personalne na naukowców po stronie konsensusu, zarzuty istnienia korupcji w środowisku naukowym i spisku osób



Obejrzyj:

Więcej o działaniu „maszyny” i ludziach z nią związanych opowiada Naomi Oreskes w tym wykładzie. »

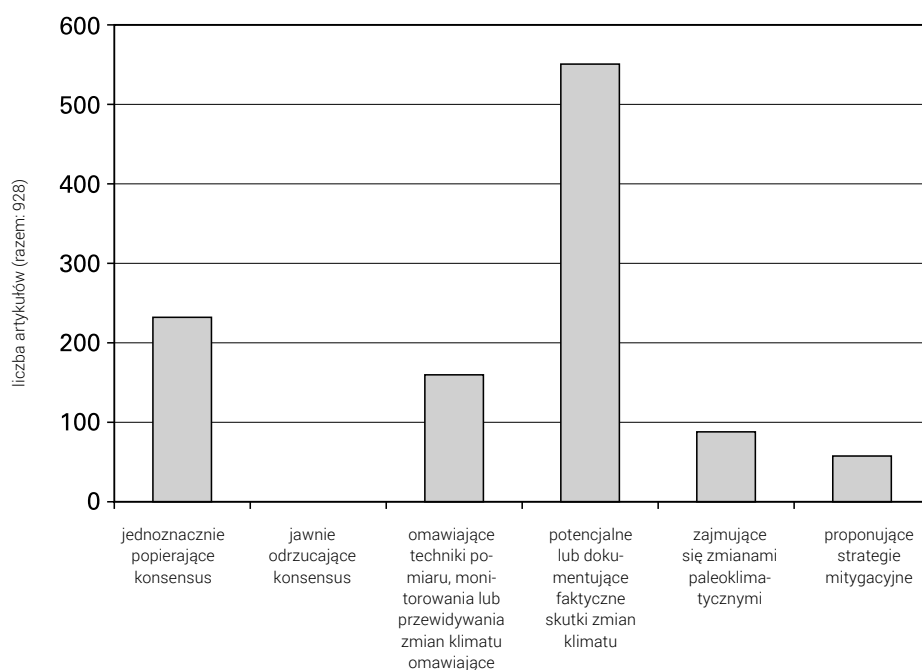
zaangażowanych w Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu. Takie wątki pojawiały się w pracach opozycyjnych naukowców (np. Lindzen, 2008) i osób niezwiązanych z nauką, reprezentujących konserwatywne think-tanki (np. Horner, 2008).

Rozpowszechnianie niepewności. Opozycyjni naukowcy zyskali status ekspertów do zmian klimatu w mediach. Byli w nich stale widoczni w kontekście dopuszczania wszystkich głosów do debaty (obok naukowców po stronie konsensusu), co też przyczyniało się do stwarzania niepewności. Po pewnym czasie opozycyjni naukowcy wypadli z głównego obiegu; wówczas skoncentrowali się na publikowaniu w nienaukowych czasopismach. Robili to zamiast publikowania w recenzowanych pismach naukowych. Edytorom i recenzentom z tychże pism zarzucali uprzedzenia do ich pracy i poddawanie ich niesprawiedliwym recenzjom. Utrzymywali, że trudno jest publikować, gdy prezentuje się poglądy odmienne od ogólnie przyjętych. Następnie publikacje opozycyjnych naukowców zaczęły krążyć w Internecie, zyskując zasięg dzięki blogosferze, think-tankom i innym konserwatywnym mediom.

Ważne! Powyższe informacje bazują głównie na przypadku Stanów Zjednoczonych, skąd „maszyna zaprzeczania” zmianom klimatu się wywodzi i gdzie pozostaje najbardziej aktywna. Warto jednak podkreślić, że denializm obecny jest również w innych krajach, takich jak Wielka Brytania, Kanada i Australia.

SKĄD WIEMY O „MASZYNIE ZAPRZECZANIA”?

W 2004 roku Naomi Oreskes, amerykańska historyczka nauki, zauważyła, że zmiany klimatu są przedstawiane w mediach jako kontrowersyjne zjawisko, co do zachodzenia którego nie ma wśród naukowców zgody. Przeanalizowała zatem 928 recenzowanych artykułów o zmianach klimatu, opublikowanych w ugruntowanych pismach naukowych w latach 1993-2003. Okazało się, że żaden z artykułów nie prezentował stanowiska przeciwnego do konsensusu naukowego. Praca Oreskes na ten temat ukazała się w „Science”, jednym z najbardziej prestiżowych czasopism, i cieszyła się dużym zainteresowaniem.



Rysunek 1: Wyniki analizy (dokładniej opisane w tym rozdziale) streszczeń artykułów, wymieniających globalne zmiany klimatu w słowach kluczowych. Artykuły podzielono na 6 kategorii: 1) jednoznacznie popierające konsensus, 2) jawnie odrzucające konsensus, 3) omawiające techniki pomiaru, monitorowania lub przewidywania zmian klimatu, 4) omawiające potencjalne lub dokumentujące faktyczne skutki zmian klimatu, 5) zajmujące się zmianami paleoklimatycznymi oraz 6) proponujące strategie mitygacyjne.

Później autorka zaczęła być atakowana (otrzymywała na przykład listowne groźby). Opowiedziała o tym Ericowi Conway'owi, historykowi NASA. Zauważył on, że ataki pochodzą od tych samych kilku opozycyjnych naukowców (fizyków), którzy kiedyś występowali przeciwko specjalście od kwestii dziury ozonowej. Co więcej, osoby te komunikowały wtedy to samo, co w przypadku zmian klimatu – że naukowcy mają wiele wątpliwości i nie zgadzają się między sobą. Przedtem podobny wzorec ataków powtórzył się też dla naukowców zajmujących się skutkami palenia tytoniu. W 2010 roku Oreskes i Conway opisali te odkrycia w książce pt.: *„Handlarze wątpliwościami”* (*Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*). Udokumentowali w niej powiązania opozycyjnych naukowców z przemysłem i konserwatywnymi think-tankami, a także naświetlili ich strategię działania, takie jak dyskredytowanie nauki czy rozpowszechnianie fałszywych informacji.

POSTAWY WOBEC ZMIAN KLIMATU W STANACH ZJEDNOCZONYCH

McCright (2016) przeanalizował dane z serii badań ankietowych, które objęły blisko 13 tysięcy dorosłych osób w próbach reprezentatywnych dla populacji USA. Respondentki i respondenci odpowiadali na pytania o to, czy ich zdaniem klimat się zmienia i w jakim stopniu używanie paliw kopalnych się do tego przyczynia. 18% odpowiadających uważało, że zjawisko zmian klimatycznych nie występuje, a 21% – że paliwa kopalne nie przyczyniają się znacząco do zmian klimatu. Dodatkowo zmierzono, jak bardzo ankietowani ufają grupom i organizacjom związanym z przemysłem paliwowym, ochroną środowiska i nauką, czyli takim, które na co dzień dostarczają ludziom informacji, jak gospodarować energią. Okazało się, że większe zaufanie dla przemysłu zwiększa prawdopodobieństwo sceptycyzmu (tym terminem posłużył się autor) wobec zmian klimatu i ich antropogenicznych przyczyn.

Rodzaje zaprzeczania można także sklasyfikować (za Kundzewicz, 2013) według odpowiedzi na 4 podstawowe pytania pokazane na rysunku poniżej. Jak widać, decydującym kryterium jest nie tylko poznawcza akceptacja faktów, ale także ich ewaluacja (czy ocieplenie nie będzie przypadkiem korzystne?), a także postawa wobec konieczności działania (czy jest ono możliwe i potrzebne?).



Rysunek 2: Rodzaje denializmu.

Za: Z.W. Kundzewicz, *Cieplejszy świat*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013, s. 159.

Na każdym z tych etapów istnieją strategie siania wątpliwości podważające nie tylko przyczyny, ale i skutki zmiany klimatu oraz szanse na wdrożenie rozwiązań. Zastanów się czy znasz – z codziennych rozmów, prasy, albo mediów społecznościowych – przykłady takich różnych rodzajów zaprzeczania.

Postawy wobec zmiany klimatu w Polsce

Jak pokazują badania, osób wprost zaprzeczających zmianom klimatu jest zarówno w Polsce, jak i na świecie niewiele. Jednocześnie ludzie rzadko zdają sobie sprawę z realnej skali zjawisk, w tym ze skali i rozmiaru ludzkiego wpływu na klimat. Poważnym problemem jest też częste przekonanie, że nic się już nie da zrobić. Może ono, bardziej niż sam denializm, stać za brakiem działania.

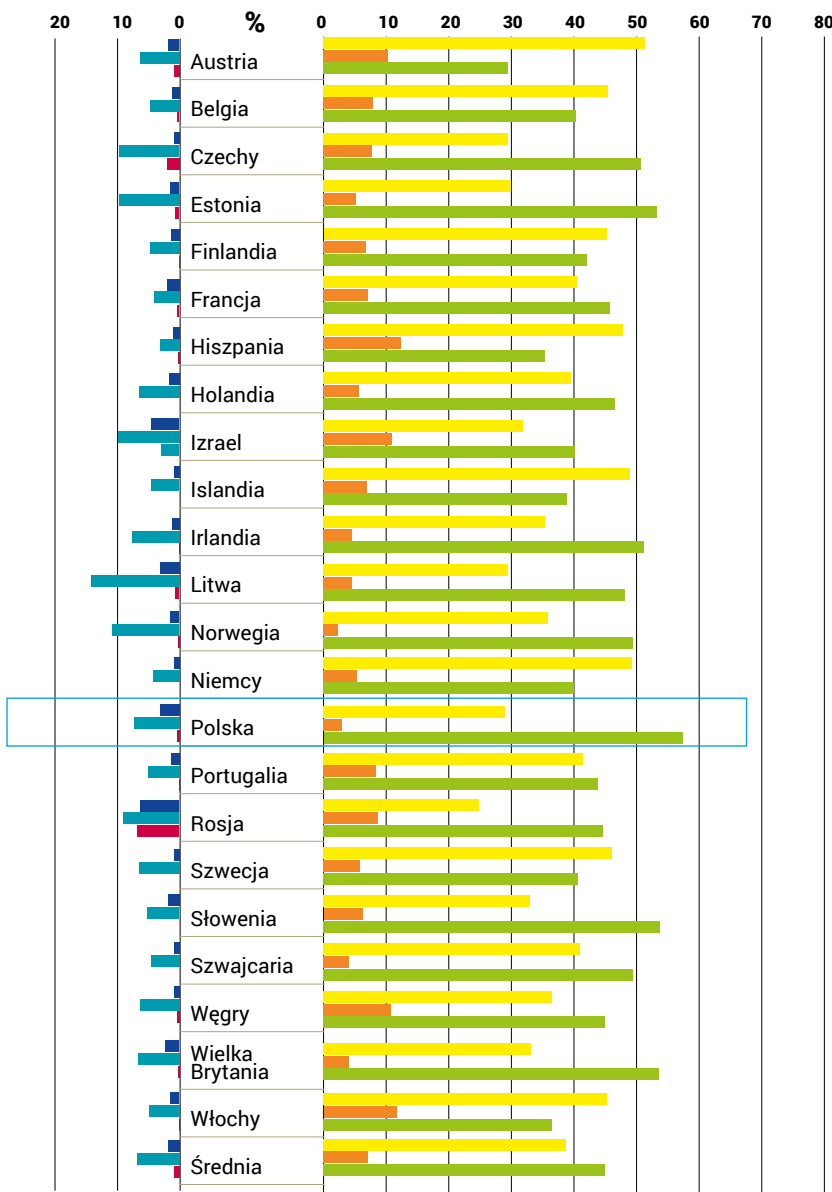
Kiedy czytamy komentarze pod artykułami dotyczącymi zmiany klimatu, możemy odnieść wrażenie, że duża część czytelników nie zgadza się z naukowymi tezami o zmianie klimatu. Podobnie jest, kiedy przysłuchujemy się wypowiedziom dziennikarzy czy polityków. Od kilku lat portal Nauka o Klimacie, zajmujący się popularyzacją wiedzy o zmianie klimatu, organizuje konkurs na tzw. klimatyczną bzdurę roku – najbardziej kuriozalną wypowiedź publiczną dotyczącą zmiany klimatu. Co roku nie ma problemu z wyborem takich wypowiedzi. Są to oczywiście tylko dane anegdotyczne, ale bardziej pogłębione analizy wskazują, że odsetek przekazów medialnych, które zaprzeczają zmianie klimatu, potrafi być znaczny. Szacuje się np., że około 47% filmów dotyczących zmiany klimatu w serwisie YouTube stanowią materiały podważające realność zmiany klimatu (Allgaier, 2019). Dodatkowo część materiałów dotyczących zmiany klimatu ma w sposób świadomy wprowadzać w błąd co do istniejącego konsensusu klimatologów w sprawie zmiany klimatu (Lewandowsky i in., 2015; Oreskes & Conway, 2010).

Jednocześnie wnioskując na podstawie samej analizy mediów czy wypowiedzi publicznych, możemy popełnić błąd i dokonać przeszacowania liczby denialistów klimatycznych w społeczeństwie – osób, które nie wierzą w zmianę klimatu lub też negują fakt, że jest ona wywołana głównie przez działalność człowieka. Duża częstotliwość występowania takich wypowiedzi w mediach może wynikać z nieproporcjonalnie dużej aktywności takich osób.

Jak więc wygląda częstotliwość niewiary w zmianę klimatu? W ramach Europejskiego Sondażu Społecznego z 2016 roku – badania prowadzonego na reprezentatywnych próbach mieszkańców większości europejskich krajów – zadano specjalny blok pytań dotyczący zmiany klimatu (European Social Survey ERIC (ESS ERIC), 2016). Pierwsze pytanie dotyczyło przekonania o realności zmiany klimatu. Odsetki poszczególnych odpowiedzi przedstawia Rysunek 2.



Widać, że w większości krajów europejskich odsetek osób, które nie są przekonane o realności zmiany klimatu, jest raczej niewielki i nie przekracza 10%. Dla Polski odsetek denialistów wynosi 7,4%. Dane te są spójne z wynikami innych badań dotyczących świadomości ekologicznej Polaków (Wójcik & Byrka, 2016). Co więcej, badania prowadzone przez bardzo różne ośrodki opinii publicznej wskazują, że jest on mniej więcej stały w czasie (Feliksiak, 2016; Gwiazda, 2016; Gwiazda & Kolbowska, 2009). Trochę bardziej złożone jest natomiast postrzeganie przyczyn zmiany klimatu. Na Rysunku 2 widać, że większość Europejczyków uważa, że wkład człowieka w kształtowanie zmiany klimatu jest większy niż ten wynikający z samych zmian naturalnych. Odsetek osób, które uważają, że zmiana klimatu nie ma miejsca lub jest spowodowana wyłącznie przyczynami naturalnymi z rzadka przekracza 10%. Jednocześnie jednak dość duży odsetek populacji jest przekonanych o tym, że do zmiany klimatu przyczyniają się w równym stopniu przyczyny naturalne i działalność człowieka. W Polsce na przykład takie osoby stanowią zdecydowaną większość – 57,2% respondentów. Jednocześnie pogląd taki jest niezgodny z wiedzą naukową, o czym dowiedzieliście się już z lekcji o mitach dotyczących klimatu.



Rysunek 3: Postrzeganie przyczyn zmiany klimatu – European Social Survey 2016 (opracowanie własne)

Czy uważa Pan/i, że zmiana klimatu jest spowodowana procesami naturalnymi, działalnością człowieka czy jednym i drugim?

- Głównie działalnością człowieka
- Wyłącznie działalnością człowieka
- Mniej więcej po równo procesami naturalnymi i działalnością człowieka
- Wyłącznie procesami naturalnymi
- Głównie procesami naturalnymi
- Zmiana klimatu nie ma miejsca

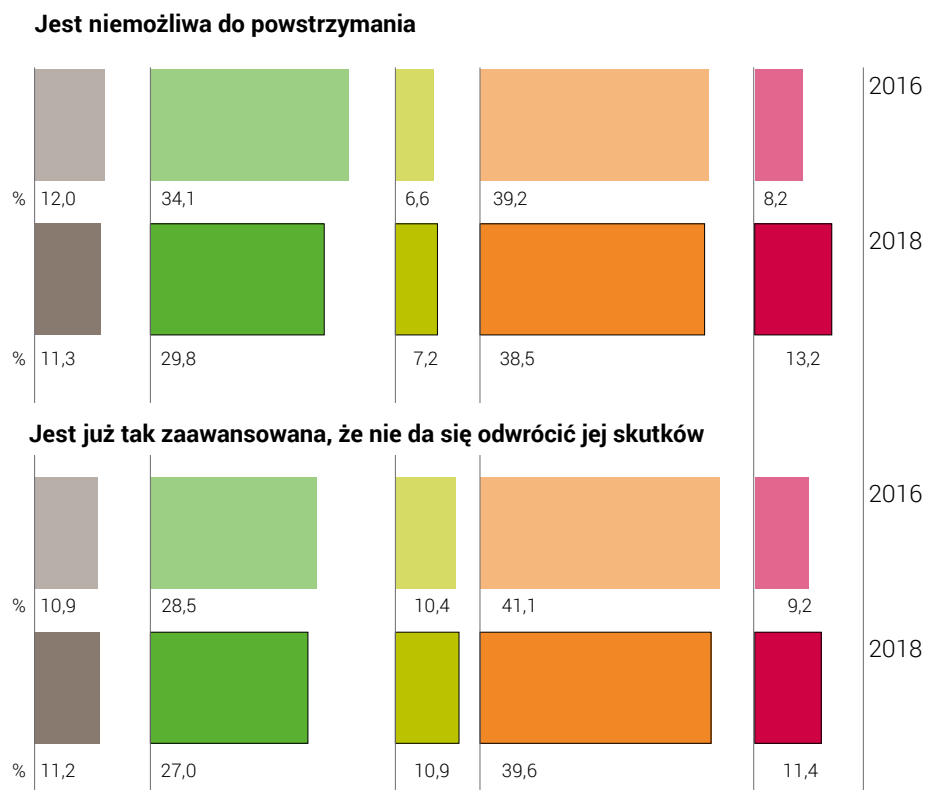
Badania opinii pokazują, że zarówno w Polsce, jak i w Europie mało jest osób, które w otwarty sposób deklarują niewiarę w zmianę klimatu. **Jednocześnie jednak dla wielu osób wciąż nie jest jasne, że największy wkład w zmianę klimatu wnosi właśnie człowiek.** Ten właśnie pogląd może być wykorzystywany w kampaniach zaprzeczających zmianie klimatu i on właśnie powinien być w pierwszej mierze wyjaśniany w dyskusji o zmianie klimatu.

Badania wskazują więc, że otwarte zaprzeczanie zmianie klimatu nie jest postawą bardzo rozpowszechnioną w społeczeństwie polskim. Brak działań na rzecz klimatu może wynikać jednak również z przekonania o tym, że zmiana klimatu jest już tak bardzo zaawansowana, że nie da się z nią nic zrobić. Prowadzone w roku 2016 i 2018 (Wójcik & Byrka, 2016) w Polsce badania pokazały, że osób, które tak uważają, mamy w Polsce około 40% (por. Rysunek 4). Może to stanowić wyzwanie dla działań mających na celu ochronę klimatu, dlatego że jednym z kluczowych ograniczeń jest brak poczucia skuteczności działań ograniczających zmianę klimatu (Stern, 2012). Dyskusja o zmianie klimatu nie może więc ograniczać się do strony naukowej, ale powinna być rozszerzona o to, co każdy z nas może zrobić, by w minimalnym chociaż stopniu ją powstrzymać (Heald, 2017).

Rysunek 4: Odsetek osób, które uważają, że zmiany klimatu nie da się już zatrzymać w latach 2016 i 2018.

Badania na próbie reprezentatywnej (N = 800).

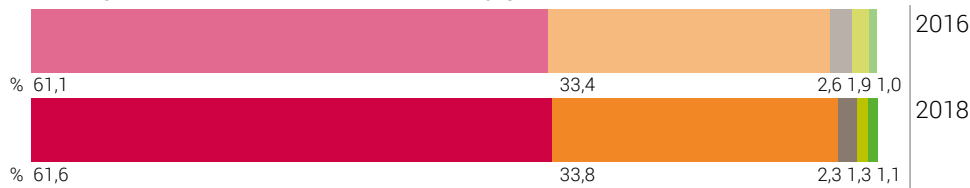
Na ile zgadzasz się ze stwierdzeniem, że zmiana klimatu...



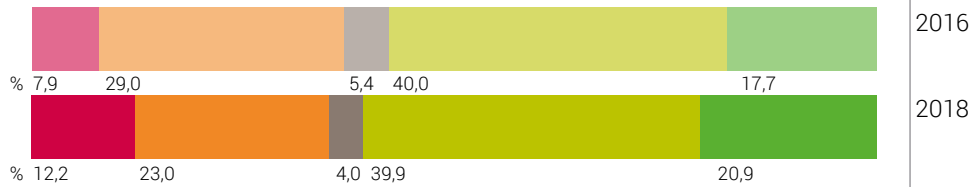
Jednocześnie towarzyszy temu przekonanie, że zmiana klimatu stanowi jedno z najważniejszych zagrożeń i wyzwań dla świata. Badania przeprowadzone w Polsce w roku 2019 (Kantar Polska, 2019) pokazują, że zagrożenie zanieczyszczeniem środowiska (wskazane przez 55% respondentów) i zmianą klimatu (wskazane przez 51% respondentów) są jednymi z czterech najczęściej wskazywanych zagrożeń globalnych. Dwa inne to zagrożenie konfliktem zbrojnym (57% respondentów) i terroryzm (52%). Jest to nowość, bo jeszcze do niedawna zagrożenia środowiskowe były postrzegane przez Polaków jako groźne, ale znacznie mniej istotne od takich zagrożeń jak np. zagrożenie terrorystyczne (Roguska, 2014). Innymi słowy, rozpoznawali zagrożenie, ale nie uznawali go za priorytetowe. Co więcej, badania opinii publicznej wskazują, że podobna zmiana zaszła w wielu innych krajach świata. Badania z roku 2019 przeprowadzone w większości krajów zachodnioeuropejskich wskazują, że zmiana klimatu jest wskazywana w większości z nich jako podstawowe zagrożenie na poziomie globalnym (Pew Research Center, 2019).

Co więcej, w przypadku Polski idzie za tym dodatkowo poparcie dla rozwiązań systemowych, które miałyby ograniczać emisji gazów cieplarnianych. Badania prowadzone w Polsce wskazują, że np. jeżeli chodzi o poparcie dla różnych form energetyki, to Polacy są najbardziej przychylni wzrostowi efektywności energetycznej oraz pozyskiwaniu energii z odnawialnych źródeł (Rysunek 5).

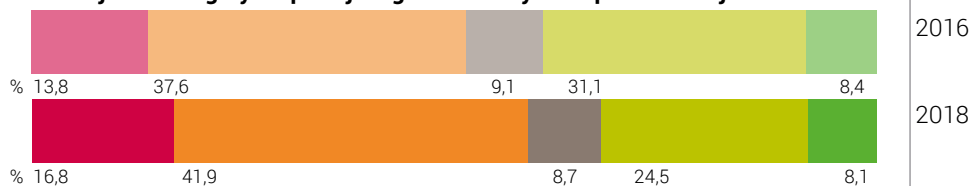
Zwiększanie udziału energetyki opartej na źródłach odnawialnych, takich jak słońce, woda, wiatr, biomasa czy gaz



Rozwijanie energetyki opartej na węglu kamiennym i brunatnym



Rozwijanie energetyki opartej na gazie ziemnym i ropie naftowej



Budowy elektrowni atomowych



Lepszego wykorzystania i zmniejszania zużycia energii



Podsumowując, tylko niewielka część Polaków w jasny sposób odrzuca dowody naukowe na zmianę klimatu. Podobnie zdecydowana większość Polaków jest przekonana o powadze zagrożenia, jakim jest zmiana klimatu. Tym, co jednak rodzi pewne zaniepokojenie, jest fakt występowania dosyć dużej (około 40-procentowej) części społeczeństwa, która nie wierzy w możliwość zatrzymania występujących już zmian. Może to znacznie ograniczać skuteczność wezwań do działań prośrodowiskowych.

Rysunek 5: Badanie w latach 2016 i 2018.

Badania na próbie reprezentatywnej (N = 1000).

Jakie Pana/Pani zdaniem powinny być kierunki rozwoju polityki energetycznej w Polsce w perspektywie najbliższych 20 lat? Czy powinno się dążyć do...



Więcej na temat postrzegania przez Polaków zmiany klimatu możesz dowiedzieć się z filmu przygotowanego na podstawie badań sondażowych realizowanych w projekcie **Ziemia nie Atakuje**. »

Jakie są bariery dla zachowań prośrodowiskowych?

Jaki jest związek braku wiedzy z brakiem działania? Dlaczego namawianie do indywidualnych zmian proekologicznych rodzi różne paradoksy? Na jakie bariery fizyczne i psychologiczne napotyka mitygacja zmiany klimatu? Tego wszystkiego dowiesz się z tego rozdziału.

Jak już wiesz z poprzedniej części tej lekcji, w większości krajów europejskich, w tym w Polsce, odsetek osób otwarcie zaprzeczających zmianom klimatycznym jest niewielki. W badaniu przeprowadzonym w 2019 roku na reprezentatywnej próbie Polek i Polaków aż 72% osób uważało, że stan, w którym znalazła się Ziemia, jest poważny i wymaga natychmiastowych działań. Co więcej, 55% osób wskazało zanieczyszczenie środowiska, a 51% zmianę klimatu jako największe zagrożenia dla świata.

POZIOM ZANIEPOKOJENIA JEST WYSOKI, ALE POZIOM WIEDZY JEST NISKI

Ludzie są zatem globalnie zaniepokojeni i jest tak także w Polsce. Jednak poziom wiedzy Polek i Polaków na temat zmian klimatycznych okazał się niski. Tylko 38% osób rozumiało różnicę pomiędzy zmianą klimatu a generalnym zanieczyszczeniem powietrza (smogiem); tylko 40% osób wiedziało, że obecne zmiany klimatu nie są częścią naturalnego cyklu. Często błędnie sądzono, że dwutlenku węgla emitowanego przez ludzi jest tak mało, że niekoniecznie ma on wpływ na klimat i że ocieplenie o 2 lub 3 stopnie Celsjusza nie będzie takie złe. Ludzie także powszechnie mylili zmianę klimatu z innymi kwestiami środowiskowymi, takimi jak problem plastiku i problem śmieci. Błędy i mity dotyczące klimatu, o których wiesz z lekcji szóstej, są powszechnie obecne w polskim społeczeństwie, a zaniepokojeniu zmianami klimatu nie towarzyszy wiedza. Jeśli umiesz – czytelniczko i czytelniku – rozróżnić pomiędzy problemem zmiany klimatu a innymi problemami środowiskowymi, jak smog czy plastik, a także wiesz, że te problemy potrzebują różnych rozwiązań, wiesz na ten temat więcej niż połowa polskiego społeczeństwa.

PROBLEM NAPIĘCIA MIĘDZY DZIAŁANAMI INDYWIDUALNYMI A ZMIANĄ SYSTEMOWĄ

Znaczny obszar niewiedzy dotyczy sfery rozwiązań. Powszechne jest przekonanie, a może i społeczna praktyka, że dla rozwiązania problemu należy przede wszystkim namawiać ludzi do bardziej ekologicznych wyborów w życiu codziennym. Kiedy jednak sądzimy, że do powstrzymania zmiany klimatu wystarczy indywidualnie oszczędzać wodę i unikać plastiku (a takie zachowania ekologiczne ludzie najczęściej wymieniają jako realne dla siebie),

Mitygacja zmiany klimatu – zespół wszystkich działań, które mają na celu ograniczenie globalnego ocieplenia. Najważniejszym z nich jest redukcja emisji gazów cieplarnianych. Mitygacja to działania, które redukują problem przyczynowo. W odróżnieniu od mitygacji, adaptacja do zmiany klimatu, oznacza łagodzenie i przygotowywanie się do skutków problemu. Niektóre działania, jak np. mała retencja wody, zachowanie dużych drzew w miastach, czy odtwarzanie gleb są zarówno adaptacją (sprawiają, że ludzie będą mniej cierpieć z powodu skutków suszy czy upału), jak i mitygacją (przyczyniają się do usuwania dwutlenku węgla z atmosfery, albo spowalniają sprzężenia zwrotne związane z postępującym ocieplaniem się klimatu).

Zobacz raport

„Ziemia atakuje” »

O tych mitach wiesz już z poprzedniego rozdziału.

Rozróżnieniu, ale i powiązaniom pomiędzy smogiem a zmianą klimatu, przyjrzymy się w dalszych lekcjach. Dowiesz się z nich między innymi, dlaczego niektóre rozwiązania problemu smogu mogą nawet pogłębić problem zmiany klimatu.

mijamy się z rzeczywistością i poczuciem proporcji. Takie zachowania, choć są etyczne, nie wystarczą i nie zawsze mają nawet bezpośredni związek ze zmianą klimatu. Eksperci zgadzają się (Ripple, 2019), że skuteczne rozwiązania musiałyby mieć charakter systemowy i powszechny. Wynika to z potrzebnej skali i horyzontu czasowego. Taki wniosek wyłania się też z lekcji o klimacie jako dobru publicznym. Z całą pewnością łatwiej jest myśleć o drobnych zmianach w życiu codziennym niż o konieczności zmiany systemowej. Ta ostatnia wymaga bowiem zbiorowego, a nie tylko indywidualnego działania, co może być trudne w indywidualistycznej kulturze zachodu. Wymaga też poczucia sprawstwa społecznego i politycznego. Wreszcie wymaga współpracy i przemodelowania wielu dziedzin życia społecznego.

Więcej na temat scenariuszy mitygacji zmiany klimatu i ograniczenia ocieplenia do 1,5 lub 2 stopni przeczytasz w dalszych lekcjach tego kursu.

Konieczna przebudowa systemu powinna obejmować przede wszystkim:

- energetykę (odejście od paliw kopalnych i jednoczesny rozwój niskoemisyjnych źródeł energii),
- transport (opodatkowanie wysokoemisyjnych środków transportu i rozwój taniego transportu publicznego),
- rolnictwo (odejście od wysokoemisyjnej produkcji, w tym mięsa, i zastąpienie jej produkcją lokalną),
- stosunek do przyrody, w tym przywracanie dzikich terenów.

Więcej o rozwiązaniach przeczytasz w ostatnich lekcjach tego kursu.

Zależności pomiędzy działaniami indywidualnymi i systemowymi są jednak złożone. Zmian systemowych nie da się wprowadzić bez powszechnego dla nich poparcia, a wiele z nich wymaga również zmian codziennych zachowań. Nawiązując do przykładów powyżej, można i trzeba zbudować system sprawnego transportu publicznego – bez tego do wielu miejsc nie da się dojechać w sposób, który nie powoduje wysokich emisji. Ale po zbudowaniu takiego systemu ludzie musieliby chcieć z niego korzystać, a w praktyce, jeśli nie zaczną się takiego systemu aktywnie domagać, jego przyszłe powstanie jest mało prawdopodobne. Także przebudowę systemu energetycznego można przeprowadzić tylko przy jednoznacznym poparciu społecznym, a nawet być może tylko wtedy, gdy ludzie będą się tego zarówno domagać, jak i być gotowi ponieść koszty zmiany, np. w postaci kosztów droższej energii.

PROBLEM NIERÓWNOŚCI W MITYGACJI ZMIANY KLIMATU

Akceptacja społeczna kosztów mitygacji jest możliwa, ale tylko wtedy, gdy jednocześnie aktywnie wspiera się rozwiązania przeciwdziałające narastaniu nierówności i tworzy się systemy wspierania osób najuboższych, tak aby zmiana nie uderzała najmocniej w najsłabszych. To bowiem stanowi jedną z podstawowych obaw ludzi i budzi najsilniejszy opór. Jeśli koszty podstawowych rzeczy, w tym energii, znacząco rosną, najsilniej uderza to w osoby, które dużą część swojego budżetu przeznaczają na rzeczy podstawowe. W efekcie powstaje poczucie niesprawiedliwości, bo ci, którzy najmniej przyczynili się do współczesnych wysokich emisji gazów cieplarnianych, ponoszą najwyższe koszty koniecznej mitygacji. Oczywiście koszty zaniechania tejże mitygacji dla najuboższych byłyby jeszcze większe, bo to oni szybciej i mocniej odczuwają skutki zmian klimatycznych. Wynika z tego, że związek mitygacji zmiany klimatu z poczuciem sprawiedliwości i realnym problem nierówności

stanowi jedną z największych barier w znajdowaniu skutecznych rozwiązań. Jednocześnie, przynajmniej na poziomie państw, takie problemy można rozwiązywać systemowo, np. stosując progresywne ceny za zużycie energii albo systemy zwracania części kosztów i inne rozwiązania ekonomiczne. Takie rozwiązania wraz z rozwojem technologii mogłyby przyczynić się do stworzenia w poszczególnych sektorach, np. energetyce, rozwiązań, które mogłyby globalnie dla społeczeństwa być nawet korzystniejsze niż dotychczasowe. Jednak wymaga to woli zmiany i zaakceptowania jej kosztów. A nawet hipotetyczna zmiana na lepsze jest odbierana jako psychologicznie kosztowna i budzi opór.

Na tych przykładach widać, że **jakakolwiek zmiana, która byłaby naprawdę skuteczna w redukowaniu emisji gazów cieplarnianych, wymaga jednocześnie kilku składników: społecznego poparcia, tworzenia przemysłowych rozwiązań systemowych i współpracy na arenie zmiany zachowań indywidualnych.**

Pytanie do refleksji:

„Najpierw niech młodzież nauczy się gasić światło.”

„Lepiej jest zbierać śmieci w lesie niż protestować.”

„To konsumenci decydują.”

Takie wypowiedzi można często usłyszeć. **Dlaczego silna obecność w dyskursie tematu pożądanych zachowań indywidualnych może być szkodliwa? Od czego odwraca ona uwagę? A może nie zgadzasz się z tą tezą?**

Jedna z aktywistek klimatycznych mówi: „Temat plastiku zrobił wiele złego dla klimatu.”

Dlaczego można tak pomyśleć?

GLÓWNE CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE INDYWIDUALNE ZACHOWANIA PROŚRODOWISKOWE

W poprzedniej części tego rozdziału pokazaliśmy, że indywidualne zachowania proklimatyczne w sferze prywatnej rodzą wiele paradoksów. Jednocześnie są one potrzebne, zwłaszcza jako krok w stronę doprowadzenia do zmiany systemowej i jej powszechnej akceptacji. Dlatego w ostatniej części skupiamy się na barierach przeszkadzających w podejmowaniu działań.

W uproszczeniu można przyjąć, że każde zachowanie ludzkie jest wynikiem interakcji pomiędzy czynnikami osobistymi i zewnętrznym kontekstem danej osoby (Guagnano i in., 1995). Do czynników osobistych zaliczamy własne przekonania, wierzenia i wyznawane wartości. Kontekst to najróżniejsze okoliczności społeczne, a także gospodarcze i polityczne. Czasami ten sam

kontekst wywiera odmienny wpływ na ludzi w zależności od czynników osobistych. Dodatkową rolę odgrywają tu prywatne zasoby, na przykład wiedza i umiejętności potrzebne do określonych działań czy wolny czas, oraz przyzwyczajenia. Związki czynników osobistych i zachowania są najsilniejsze w neutralnym kontekście, ale słabną, kiedy wpływ kontekstu zwiększa się (np. gdy kogoś odgórnie zmuszamy do jakiegoś zachowania lub zakazujemy go; Stern, 2000). W praktyce oznacza to, że im jakieś zachowanie jest trudniejsze (np. kosztowniejsze) do wykonania, tym w mniejszym stopniu zależy od czynników osobistych, jeżeli nie jest przy tym odpowiednio wzmacniane przez kontekst (np. wymogiem prawnym). **Wydaje się zatem, że zachowania o największym realnym oddziaływaniu na zmiany klimatu to zachowania, które słabiej zależą od czynników osobistych (w tym nawet np. zaniepokojenia zmianami klimatycznymi), a silniej od czynników zewnętrznych** (Stern, 2000).

ZANIEPOKOJENIE A DZIAŁANIE

Badacze Hall, Lewis i Ellsworth (2018) przez rok śledzili postawy wobec zmian klimatycznych i zachowania prośrodowiskowe 600 dorosłych Amerykanów. W próbie tej zidentyfikowali trzy grupy: sceptyków klimatycznych, osoby „ostrożnie zmartwione” (o umiarkowanych poglądach na temat zagrożenia) i osoby „wysoce zaniepokojone” zmianami. Okazało się, że to sceptycy najczęściej angażowali się w indywidualne zachowania prośrodowiskowe, takie jak korzystanie z transportu zbiorowego czy z toreb zakupowych wielokrotnego użytku. W przypadku „wysoce zaniepokojonych” silna wiara w prawdziwość zmian klimatycznych przewidywała nie działania prywatne, ale poparcie dla regulacji prawnych mających na celu walkę z ociepleniem (np. podniesienie podatku na benzynę). Autorzy badania dodatkowo zwrócili uwagę na fakt, że wiara w zmiany klimatyczne zależy od pory roku – w ciepłych miesiącach badani raportowali wyższy poziom wiary niż w okresie niższych temperatur.

BARIERY STRUKTURALNE (na podstawie raportu APA; Swim et al., 2009)

Na przeszkodzie do wprowadzania prośrodowiskowych działań w życie stoją następujące bariery strukturalne:

- **fizyczne** – np. mieszkając na źle skomunikowanych przedmieściach, trudno ograniczać używanie samochodu,
- **ekonomiczne** – np. niskie dochody ludzi czy małych przedsiębiorstw mogą nie pozwalać na zmianę systemów domowych czy biurowych na bardziej ekologiczne
- **instytucjonalne** – np. brak dopłat do prośrodowiskowych inwestycji
- **kulturowe** – np. gdy określone przedmioty są wyznacznikiem statusu społecznego.

Wymienione bariery uważa się za będące generalnie poza indywidualną kontrolą (Swim i in., 2009).



[Cały raport APA »](#)



BARIERY PSYCHOLOGICZNE (Gifford, 2011)

Klasyczne bariery psychologiczne opisał profesor psychologii środowiskowej Robert Gifford i nazwał je **smokami braku działania** (Dragons of Inaction). Pokazuje on, że istnieje aż 36 znanych i opisanych rodzajów takich barier. Smocza metafora ma za zadanie pokazać, że są one rodzajem przeciwników, a ich znajomość może pomóc w walce z nimi.

Bariery psychologiczne, jak się wydaje, tworzą się w trzech fazach. Najpierw prawdziwa niewiedza wyklucza podjęcie jakichkolwiek działań. Następnie, gdy ktoś już ma świadomość problemu, różnorodne procesy psychologiczne znów powstrzymują skuteczne działanie. W końcu, gdy ktoś podejmuje jakieś działanie, często okazuje się ono niewystarczające: nie jest kontynuowane wystarczająco długo, by zaowocować zmianą zachowania na stałe, albo jego skutki są wręcz przeciwne do zamierzonych. W te ogólne fazy wpisują się następujące bariery:

ograniczone poznanie (*limited cognition*) – w toku ewolucji ludzki mózg rozwinął się tak, aby zwracać uwagę przede wszystkim na najbliższe otoczenie w krótkiej perspektywie czasowej (*ancient brain*). Dlatego stosunkowo ciężko myśleć nam o procesach zachodzących globalnie i na przestrzeni wielu lat. W wielu miejscach zmiana klimatu nie wpływa jeszcze wyraźnie na funkcjonowanie społeczeństwa, a więc ludzie nie mają motywacji do zwracania uwagi na czysto teoretyczny dla nich problem (*environmental numbness*). W takich warunkach łatwo tkwić w niewiedzy (*ignorance*). Dotyczy ona braku świadomości istnienia problemu, braku wiedzy, skąd ten problem się wziął lub co robić w jego obliczu. Dodatkowo niemożność zrozumienia związków między aktywnością ludzi i zmianami klimatu jest potęgowana przez sprzeczne wiadomości podawane w mediach. Czasami wiadomości te wręcz mają na celu zamierzoną dezinformację i rozprzestrzenianie niepewności. Wiesz o tym z wcześniejszych części tego rozdziału. A niepewność (*uncertainty*) co do mechanizmów zmian klimatu także powstrzymuje przed działaniem. Co więcej, ludzie wykazują tendencję do niedoceniań ryzyka (*judgmental discounting*) i tym samym zbyt dużego optymizmu (*optimism bias*) w odniesieniu do wystąpienia danych skutków, np. myślą, że gdzie indziej będzie gorzej niż w ich miejscu zamieszkania. Uważają także, że wobec globalnego zagrożenia sami nie mogą nic zrobić, bo nie mają żadnej kontroli (*behavioral control*) nad wszechobecnym zjawiskiem, albo że jeśli coś zrobią, to to i tak nie wystarczy. Poczucie braku kontroli i skuteczności własnych działań (*self-efficacy*) łączy się z fatalizmem, czyli przekonaniem, że nic nie da się zrobić.

ideologie (*ideologies*) – to, jakie poglądy (*worldviews*) wyznają ludzie, kształtuje wiele aspektów ich życia. Na przykład, jeżeli są zwolennikami liberalizmu ekonomicznego, który utożsamiają z dobrobytem, a który, w skrajnej wersji, sprzeciwia się regulacjom w obszarze dóbr wspólnych i z powodu przekonania o nieograniczonej dostępności zasobów naturalnych przyczynia się do dewastacji środowiska, mogą negować zmianę klimatu. Jeśli wierzą w bogów (*suprahuman powers*) i ich sprawczość, mogą przeczuwać, że ci

tak czy inaczej zrobią to, co będą chcieli, lub oczekiwać, że nie opuszczą ich w potrzebie. Na przykład niektórzy mieszkańcy wysp na Pacyfiku kupują ziemię w wyżej położonych rejonach, bo ich domy będą zalane przez rosnący poziom mórz, a inni oczekują, że bóg nie dopuści do kolejnej powodzi po tej, która miała miejsce w czasach biblijnych. Ci, którzy wierzą w nowe technologie, spodziewają się, że nauka zaradzi zmianom klimatu (*technosalvation*). Ci, którzy żyją w relatywnym dobrostanie, mają tendencję do bronięcia swojego *status quo* (*system justification*), nie chcą zaburzać tego stanu i nie chcą dopuścić, by inni to robili. A przecież zmiana klimatu wymaga zmian.

porównywanie się z innymi (*comparisons with other people*) – ludzie mają naturalną skłonność do porównywania się z innymi. W toku porównań społecznych (*social comparison*) zestawiają swoje działania z działaniami innych i stąd czerpią wzorce co do tego, co jest szeroko przyjętym i tym samym odpowiednim działaniem. Znają też normy obowiązujące w danej grupie społecznej czy społeczeństwie jako całości (*social norms*). Normy te mogą zachęcać do zmian, ale mogą je też powstrzymywać. Na przykład w pewnym badaniu mówiono ludziom, ile energii zużywają w domach ich sąsiedzi. Badani później dopasowywali swoje własne zużycie do innych, czyli zwiększali je, gdy inni używali więcej energii, i zmniejszali, gdy inni używali jej mniej niż oni (Schultz i in., 2007). Porównywanie się z innymi sprawia też, że ludzie zauważają nierówności (*perceived inequity*). Zastanawiają się, czemu mieliby zmieniać swoje zachowanie, gdy inni tego nie robią. Na przykład odnoszenie się do innych narodów czy państw, które nie ograniczają emisji, jest często powodem braku działania.

utopione koszty (*sunk costs*) – rozstawanie się z określonymi inwestycjami finansowymi (*financial investments*) jest dla większości ludzi trudne. Przykładem tego jest samochód: jego zakup, ubezpieczenie i utrzymanie sprawiają, że ludzie nie chcą porzucić wygodnego środka transportu na rzecz mniej emisyjnego rozwiązania. Jeśli użytkownik samochodu zewsząd słyszy, że jest to szkodliwe dla środowiska, może doświadczyć dysonansu poznawczego. To nieprzyjemny, niepożądany stan, którego łatwiej się pozbyć zmieniając myślenie (samochody nie są aż tak szkodliwe) niż zachowanie (przebrać się na rower). Co więcej, powtarzane zachowanie (jak np. używanie samochodu) staje się nawykiem. Nawyki są niezwykle odporne na zmiany, a jeśli już, to zmiana taka trwa bardzo długo.

dyskredytowanie innych (*discredence*) – jeśli ludzie negatywnie postrzegają innych, nie będą ich słuchać. Negatywne postawy mogą wyrażać się w braku zaufania (*mistrust*), które jest kluczowe dla zdrowych relacji. Gotowość do zmiany zachowania opiera się, między innymi, na zaufaniu, że nie zostaniemy wykorzystani, lecz obywatele czasami nie ufają w tej kwestii władzom czy politykom. Równie ważnym czynnikiem jest wiara w to, że jakieś działanie jest warte zachodu. To jednak okazuje się niemal nieosiągalne w sytuacji, gdy dane zachowania nie są obowiązkowe, czyli regulowane prawnie, i można dowolnie wybierać, czy się coś robi czy nie, bez odgórnych konsekwencji.

postrzegane ryzyko (*perceived risk*) – osoby, które rozważają zmianę zachowania na bardziej ograniczające emisje gazów cieplarnianych, muszą liczyć się z różnymi rodzajami ryzyka: funkcjonalnym – czy coś zadziała tak, jak oczekujemy; fizycznym – czy coś jest bezpieczne; finansowym – czy i kiedy inwestycja się zwróci (na przykład instalacja paneli słonecznych); społecznym i psychologicznym – jak ocenią nas inni w nowej sytuacji; czasowym – spędzenie wielu dni, tygodni czy miesięcy na wprowadzeniu nowego rozwiązania w życie może końcowo nie przynieść tak satysfakcjonującego rezultatu, jak się spodziewaliśmy.

ograniczone zachowanie (*limited behavior*) – wielu ludzi podejmuje przynajmniej minimalne działania, które pomagają w jakimś stopniu ograniczać emisje. Jednocześnie wiele osób zgadza się, że mogłoby robić więcej. Jedne zachowania są łatwiejsze do wprowadzenia niż inne, ale mają relatywnie małe znaczenie wobec globalnej katastrofy. Jednak to, że są łatwe, sprawia, że ludzie angażują się w nie, podejmując w ten sposób wysiłek symboliczny (*tokenism*), zamiast angażować się w bardziej kosztowne zachowania o większym wpływie. W końcu, gdy już podejmą początkowy wysiłek, ich dalsze akcje anulują początkowy pozytywny efekt (*the rebound effect*), na przykład gdy ktoś kupuje bardziej wydajny samochód, ale jeździ nim częściej i dalej niż mniej wydajnym.

PODEJŚCIA DO ZMIANY ZACHOWANIA

Norweski psycholog i ekonomista Per Espen Stoknes w swojej książce zatytułowanej „*What we think about when we try not to think about global warming: Toward a new psychology of climate action*”, wydanej w 2015 roku, przedstawił nową perspektywę na zachowania prośrodowiskowe. Na początku zauważył pewien paradoks: mimo konsensusu naukowego w kwestii zachodzenia zmian klimatycznych i ich przyczyn, ludzie wciąż nie podejmują wystarczających działań, by zmiany te zatrzymać (a część ludzi nadal w zmiany nie wierzy). Uznał to za ogromną porażkę komunikacyjną i opisał, w jaki sposób komunikację poprawić tak, aby móc pokonać najpoważniejsze przeszkody do działania (np. wybrane bariery psychologiczne). Rekomendował między innymi opisywanie zmian klimatycznych jako przestrzennie bliskich każdemu człowiekowi i nieoddalonych w czasie, rozpowszechnianie informacji sformułowanych w pozytywny sposób, zamiast takich, które potęgują negatywne emocje i fatalizm, oraz ograniczanie społecznej polaryzacji w kwestii zmian klimatycznych. Podkreślił, że wiadomości powinny być inspirujące i stymulować wspólnotowość, by rozbudzić chęć do zmiany społecznej, skuteczniejszej niż działania jednostkowe.

Komunikacja na temat zmian klimatycznych – szczególnie w formie zwykłych, codziennych rozmów z innymi – jest uznawana za jeden z najsukcesyjniejszych sposobów podtrzymywania zaangażowania, skłaniania do refleksji nad własnym zachowaniem i włączania w procesy zmiany społecznej (APS, 2017). Według Stoknesa konkretne rozwiązania oparte na pozytywnej komunikacji obejmują:

- odnoszenie się do lokalnych społeczności i norm w nich obowiązujących, co pozwala wykorzystać ludzką tendencję do naśladowania



Książkę Australijskiego Towarzystwa Psychologicznego można pobrać stąd: »

innych (np. jeśli ktoś wie, że jego sąsiedzi oszczędzają energię, prawdopodobnie też zacznie to robić. Ludzie mają łatwość zauważania, co stanowi „normalne” zachowanie w określonych warunkach i chętnie sami się tak zachowują; Cialdini, Reno & Kallgren, 1990), oraz wykorzystywanie osób uznawanych za wpływowe (np. powszechnie znanych aktorów czy celebrytów, ale też miejscowych liderów, kierowników organizacji itp.) do rozpowszechniania informacji (ta strategia sprawdziła się na przykład w kampaniach antynikotynowych w Stanach),

- przewagę pozytywnych emocji i uczuć w przekazie, czyli omawianie przyszłych innowacji technologicznych, możliwości stwarzania nowych, „zielonych” miejsc pracy, sposobów przygotowania się na zmiany klimatyczne, oraz promocja zdrowia i utrzymanie dobrego samopoczucia – a wszystko to w kontekście wspólnych celów do osiągnięcia,
- prezentowanie bardziej ekologicznych wyborów jako najłatwiejszych w danej sytuacji,
- zastąpienie opowieści o nadchodzącej apokalipsie opowieściami o konkretnych wizjach „zielonej przyszłości”
- znalezienie nowych wskaźników „zielonego wzrostu” zamiast wskaźników postępowania katastrofy (takich jak emisje gazów cieplarnianych czy wymierające gatunki zwierząt).

EDUKOWANIE ZAMIAST STRASZENIA.

Znaczenie pozytywnej komunikacji wyłoniło się także ze wspomnianego już badania „Ziemianie atakują” (Kantar, 2019). Autorzy raportu podkreślili, że komunikacja powinna być przede wszystkim zorganizowana wokół rozpowszechniania wiedzy, włączając w to aspekty ekonomiczne prośrodowiskowych zachowań (np. możliwości oszczędności). Ich najważniejszym wnioskiem było to, że to właśnie wiedza na temat zmian klimatycznych zwiększa gotowość do różnorodnych działań, takich jak:

- poparcie dla szczególnie istotnych z punktu widzenia realnego wpływu na klimat rozwiązań systemowych – tu na przykład aż 89% osób z dużą wiedzą zgadzało się na odejście od spalania węgla i zastąpienie go odnawialnymi źródłami energii
- otwartość na osobiste wyrzeczenia.

Wydaje się zatem, że dalsza powszechna edukacja, prowadząca do szerokiego społecznego rozumienia problemu, jest szansą na realne ograniczenie zmian klimatycznych.

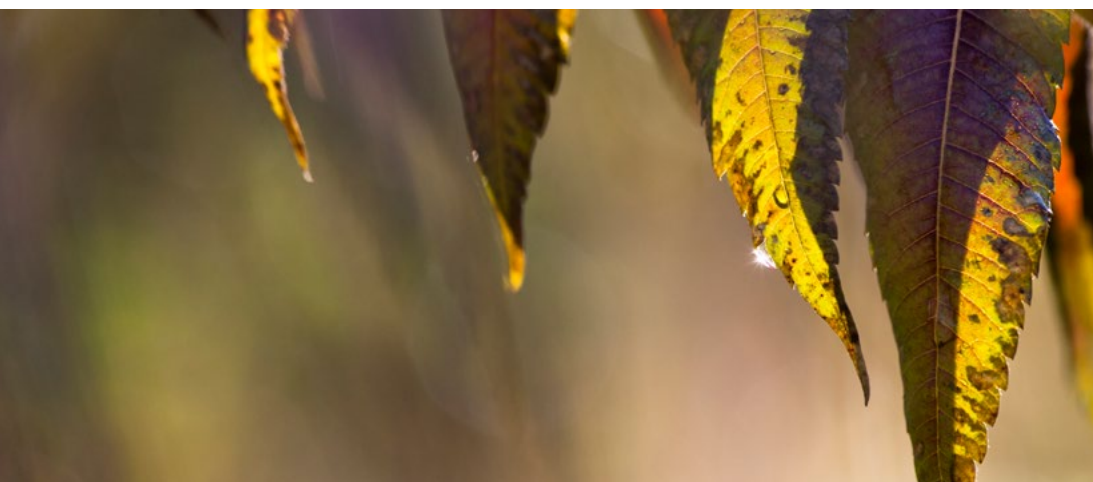


Przykład znanego badania znajdziesz tu »



Jeśli chcesz widzieć więcej o tym jak psychologia społeczna i środowiskowa wyjaśniają postawy wobec zmiany klimatu możesz obejrzeć ten wykład »

Dr Adrian Wójcik wyjaśnia w nim między innymi czemu komunikacja oparta na straszeniu może być nieskuteczna, a problemy środowiskowe wydają się zawsze gorsze u sąsiadów.





KLIMATYCZNE ABC

Wpływ rozwoju gospodarki przemysłowej na stan klimatu i przyrody

W tej lekcji zostaną zarysowane podejścia ekonomistów do problemu emisji gazów cieplarnianych, pochodzących z gospodarczej działalności człowieka.

W środowisku ekonomicznym są oczywiście osoby o różnych poglądach i nie jest możliwe przedstawienie w krótkim tekście wszystkich tych postaw.

Stanowisko ekonomistów, które jest najczęściej widoczne w mediach, koncentruje się na wzroście gospodarczym. Według takiego podejścia głównym celem jest zapewnienie stałego, jak najwyższego tempa wzrostu, a znaczenie innych czynników ocenia się przede wszystkim przez pryzmat ich wpływu na tempo wzrostu PKB. Ale są też ekonomiści, dla których centralne znaczenie ma fakt, że Ziemia jest przestrzenią ograniczoną fizycznie, a gospodarka człowieka jest jednym z wielu systemów jednocześnie funkcjonujących na naszej planecie. W tej perspektywie najważniejsze jest zapewnienie trwałości istnienia zarówno ludzi, jak i innego życia na Ziemi, oraz jakościowy rozwój oparty o optymalne korzystanie z ograniczonej puli zasobów.

Poniższa lekcja przedstawi stanowiska, które wyróżniają się w ekonomicznych dyskusjach na temat globalnego ocieplenia, oraz zarysuje kontekst historyczny, który je kształtował.

Przedstawimy też historię działań zmierzających do ograniczenia zasięgu tzw. „dziury ozonowej”. Jest to ciekawy przykład pokazujący, jak osiągnięto międzynarodowe porozumienie chroniące wspólny zasób, które było satysfakcjonujące zarówno dla stron skoncentrowanych na maksymalizacji zysku, jak i tych zwracających uwagę na stan środowiska, w którym żyjemy. Jest to ważny przykład, bo temat tzw. „dziury ozonowej” był pod wieloma względami podobny do obecnie zagrażającej nam zmiany klimatu.

Jak do kryzysu klimatycznego i ekologicznego podchodzi ekonomia?

W pierwszej części lekcji pokażemy, jak zmieniało się podejście ekonomistów oraz społeczeństw do środowiska naturalnego. Rewolucja przemysłowa dała ludziom siłę, której nigdy wcześniej nie mieli. Pozwoliła kształtować świat według ich pomysłu i likwidować ograniczenia wyznaczone przez środowisko. Znaczna część ekonomistów nadal uważa, że ludzkość nie zejdzie już z drogi prowadzącej do coraz wyższego poziomu rozwoju i bogacenia się. Są jednak silne argumenty wskazujące, że ten okres dobiega końca, a gospodarka przemysłowa zbliża się do fizycznych i biologicznych limitów naszej planety.

DLACZEGO STANOWISKO EKONOMISTÓW JEST ISTOTNE?

W liście otwartym podpisanym w 2019 roku przez 11 000 naukowców z całego świata czytamy, że: *musimy jak najszybciej ograniczyć nadmierne wydobycie surowców i eksploatację ekosystemów, które towarzyszą nieustannemu wzrostowi gospodarczemu. Potrzebujemy gospodarki bezwęgłowej, opartej na zrozumieniu naszej zależności od biosfery, oraz rozwiązań politycznych, które odpowiednio ukierunkują decyzje gospodarcze. Naszym celem nie powinno być utrzymanie nieustannego wzrostu PKB i dążenie do coraz większego bogactwa, ale zachowanie ekosystemów i poprawa jakości życia poprzez przyznanie priorytetu podstawowym ludzkim potrzebom i zmniejszenie nierówności społecznych.*

W tym krótkim akapicie wyraźnie widać, że środowisko naukowe krytykuje obecny model gospodarki napędzanej paliwami kopalnymi i dążącej do jak najszybszego wzrostu.

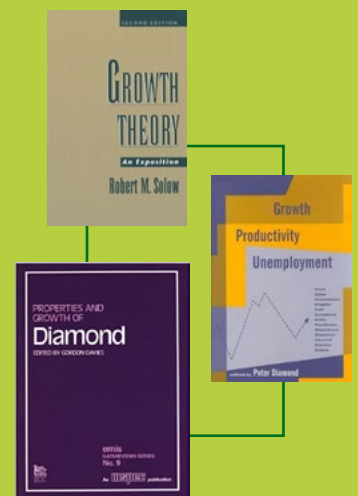
Jak zatem do tej krytyki podchodzą ekonomiści? To pytanie jest istotne, bo uzasadnione jest przypuszczenie, że stanowisko ekonomii jako dziedziny nauki ma istotny wpływ na sposób, w jaki rządy państw reagują na kryzys klimatyczny.

EKONOMIA NA ROZSTAJU

Korzeni dominującego obecnie podejścia można szukać w stworzonych w XX wieku i, w nieco zmodyfikowanej formie obowiązujących do dziś, modelach wzrostu gospodarczego (np. Solowa-Swana, Ramseya, Diamonda, Romera) czy funkcjach produkcji (np. Cobba-Douglasa). Te równania pokazują, jaka jest – zdaniem ekonomistów – zależność pomiędzy tzw. czynnikami produkcji a wielkością gospodarki. Patrząc na składowe tych funkcji, widzimy, co zdaniem ich autorów jest potrzebne, aby gospodarka mogła funkcjonować. W tej lekcji nie będziemy się zagłębiać w matematyczne formuły tych równań. Zainteresowane osoby mogą sięgnąć do dowolnego podręcznika z makroekonomii, gdzie są one opisane. Z naszego punktu widzenia istotne jest, co zdaniem ekonomistów głównego nurtu jest zaliczane do tzw. czynników produkcji. Są to „praca”, „kapitał” oraz „technologia”. Warte odnotowania jest to, że nie uwzględnia się tu żadnego czynnika łączącego system ekonomiczny ze środowiskiem przyrodniczym.



Pełną treść listu otwartego, podpisanego przez 11 258 naukowców, możesz zobaczyć tu »



Dowiedz się więcej o makroekonomii:

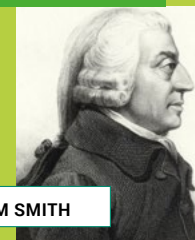
Modele i wzrost gospodarczy we współczesnych państwach »

Modele wzrostu gospodarczego »

Dlaczego tak jest? I czy tak było zawsze? Zaczynając od drugiego pytania – nie, wcześniej podchodzono do tego inaczej. Klasycy teorii ekonomii, tacy jak Adam Smith (1723–1790), David Ricardo (1772–1823) czy John Stuart Mill (1806–1873) rozumieli, że gospodarka potrzebuje zasobów naturalnych i uznawali ziemię (ang. *land*) jako jeden z podstawowych czynników produkcji. Zmieniło się to w XX wieku, gdy gospodarka przemysłowa zaczęła się szybciej rozwijać, a produkcja rolna zaczęła tracić na znaczeniu. Skupiono się wtedy na czynnikach, które mają podstawowe znaczenie dla produkcji przemysłowej, a więc pracy i kapitale, a nieco później zaczęto uwzględniać również poziom rozwoju technologicznego. Panowało wtedy przekonanie, że zasoby naturalne są dostępne w tak dużej ilości, że nie są one istotnym czynnikiem ograniczającym potencjał produkcyjny i usunięto „ziemię” z funkcji produkcji.

Takie podejście dominowało długo. Aż do lat 60. XX wieku gospodarkę rozwijano, praktycznie nie zwracając uwagi na jej wpływ na środowisko naturalne. Natura była traktowana przede wszystkim jako siła, z którą trzeba walczyć, która blokuje ekspansję gospodarki, a nie jako coś, co wymaga szczególnej troski. Jednak w latach 60. i 70. zaczęło się to zmieniać za sprawą wydarzeń, które skrótowo warto tu przytoczyć.

Dziś uznaje się, że symboliczna zmiana nastąpiła w chwili publikacji książki Rachel Carson „*The Silent Spring*” („*Milcząca wiosna*”) w 1962 roku. **Książka opisywała negatywne efekty stosowania chemicznej substancji owadobójczej pod nazwą handlową DDT. Była to pierwsza publikacja poruszająca temat negatywnego wpływu działalności człowieka na środowisko, która odniosła tak duży sukces sprzedażowy.** Książka została sprzedana w ponad 6 milionach egzemplarzy, przetłumaczono ją na 30 języków, a jej pojawienie się jest współcześnie uznawane za początek ruchu ekologicznego. Dziś mamy podstawy, aby przypuszczać, że tak ostra krytyka środka DDT była przesadzona. Obecne badania pokazują, że jest on mniej szkodliwy od obecnie stosowanych pestycydów i – paradoksalnie – efektem popularności tej książki mogło być wycofanie taniego i relatywnie mało szkodliwego DDT, a zastąpienie go silniejszymi środkami. Natomiast niezależnie od kontrowersji wokół faktycznego zagrożenia, jakie powodowało DDT, książka R. Carson na stałe zmieniła postawę opinii publicznej, zwracając uwagę na fakt, że przyroda może być poważnie zagrożona zmianami, jakie powoduje gospodarka człowieka.



ADAM SMITH



DAVID RICARDO



JOHN STUART MILL



RACHEL CARSON



1962

Dziś wiemy, że w tym czasie firmy paliwowe były już w pełni świadome, jaki wpływ na klimat ma spalanie paliw kopalnych. Szeroka opinia publiczna tej wiedzy jeszcze nie miała, ale osoby kierujące firmami paliwowymi już tak. Wpływ gazów cieplarnianych na klimat został jednoznacznie opisany w raporcie z 1968 roku, przygotowanym dla Amerykańskiego Instytutu Naftowego. Podobne wnioski z badań prowadzonych przez Exxon Mobile zaprezentował James Black zarządowi tej firmy w 1977 roku.



Raport z 1968 »



Artykuł opisujący ukrywanie przez firmę Exxon wiedzy o wpływie spalania paliw kopalnych na zmiany klimatu »

Kolejną ważną publikacją, która pojawiła się w tym okresie, był raport Klubu Rzymskiego z 1972 roku „*Granice Wzrostu*”. Autorzy zwrócili uwagę na fakt, że istnieją naturalne, środowiskowe limity dla ekspansji gospodarki przemysłowej.

Przedstawili analizę pokazującą, że stały wzrost gospodarczy nieuchronnie prowadzi do wyczerpania skończonych zasobów naturalnych Ziemi, a w konsekwencji do załamania gospodarki. Publikacja ta była zupełnie niezgodna z obowiązującymi w tamtym czasie poglądami i początkowo była bardzo krytykowana przez ekonomistów, naukowców i polityków. Np. Solow (autor nauczanego do dziś modelu wzrostu) kwestionował dane, na których oparto wyliczenia, a do krytycznych głosów dołączyli inni szanowani w tym czasie ekonomiści (m. in. Wallach, Kneese, Riker). Pomimo krytyki, „*Granice Wzrostu*” odniosły ogromny sukces. Sprzedano 12 milionów egzemplarzy, a raport przetłumaczono na 37 języków.

Jakby na potwierdzenie analizy opublikowanej w „*Granicach Wzrostu*”, w latach 70. miały miejsce dwa potężne kryzysy paliwowe. Pierwszy, w 1973 roku, doprowadził do wzrostu cen ropy o około 400%, a kolejny, w 1979 roku, podniósł ceny jeszcze o 100%, co oczywiście spowodowało duży kryzys gospodarczy. Należy tu wyjaśnić, że kryzys był wywołany decyzją kartelu naftowego OPEC o zmniejszeniu poziomu produkcji, aby podnieść światowe ceny ropy. Wzrost cen nie był więc wywołany wyczerpaniem się zasobów, ale decyzją ludzi, aby dostęp do tych zasobów ograniczyć. Jednak z punktu widzenia ekologii, ważnym skutkiem kryzysu było uświadomienie mieszkańców rozwiniętych państw, jak bardzo ich gospodarki są zależne od stałego dopływu surowców i co może się stać, gdy ten dostęp zostanie ograniczony, niezależnie z jakiego powodu.

Biorąc pod uwagę te wydarzenia, lepiej można zrozumieć dlaczego prezydent Carter zdecydował się wygłosić dwa ważne wystąpienia: „Address to the Nation About Energy Problem” z kwietnia 1977 roku (The New York Times, 1977) oraz „A crisis of Confidence” z lipca 1979 roku (American Experience, 2019). W obu tych wystąpieniach **zwracał uwagę na zagrożenia związane z rozwojem polegającym na stałym wzroście konsumpcji i wynikającym z tego rosnącym zapotrzebowaniem na energię.** Mówił, że rozwój nie musi być oparty o stale rosnące zużycie zasobów i że w życiu warto dążyć do innych celów niż tylko konsumpcja. Wyraził przed Amerykanami wybór pomiędzy ograniczeniem konsumpcji energii i wolnością a rosnącą konsumpcją i zależnością od importowanej energii. Zachęcał do świadomego ograniczenia konsumpcji i wskazywał na zagrożenia, jakie się wiążą z uzależnieniem amerykańskiej gospodarki od stale rosnących dostaw ropy naftowej:

Znajdujemy się w punkcie zwrotnym naszej historii. Są dwie ścieżki do wyboru. Jedną z nich jest ścieżka, przed którą ostrzegałem dziś wieczorem, ścieżka, która prowadzi do podziałów i egoizmu. Na końcu tej drogi leży błędne wyobrażenie o wolności, o prawie do zagarnięcia dla siebie przewagi nad innymi. Droga ta byłaby ciągłym konfliktem ograniczonych interesów, kończącym się w chaosie i stagnacji. Jest to pewna droga do porażki.

Wszystkie tradycje naszej przeszłości, wszystkie lekcje naszego dziedzictwa, wszystkie obietnice naszej przyszłości wskazują na inną drogę – drogę wspólnego celu i przywrócenia wartości amerykańskich. Ta ścieżka prowadzi do prawdziwej wolności dla naszego narodu i dla nas samych. Możemy podjąć pierwsze kroki na tej drodze, gdy zaczniemy rozwiązywać nasz problem energetyczny.

Raport
Klubu
Rzymskiego



1972



JIMMY CARTER
prezydent USA
1977-1981



Wystąpienie
prezydenta
Cartera »

1977



Wystąpienie
prezydenta
Cartera »

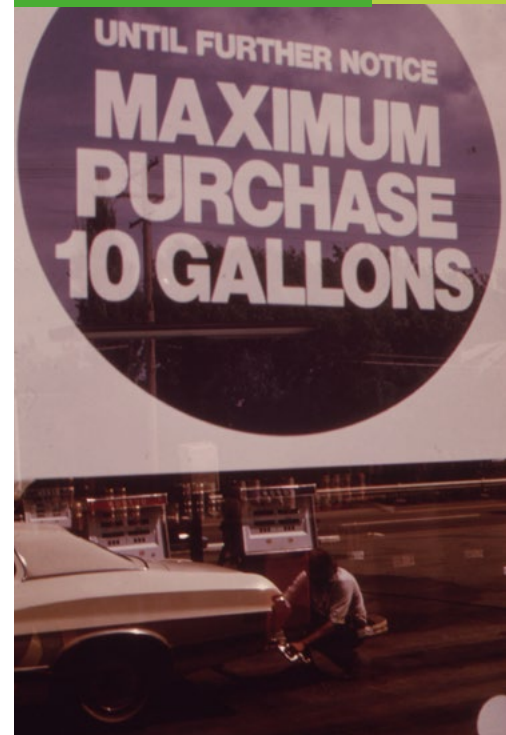
1979

Słowa prezydenta USA skierowane były do Amerykanów, ale dobrze wyrażają wybór, przed jakim stanęły w tamtym czasie również inne kraje rozwinięte, podobnie jak USA dotknięte kryzysem paliwowym i wynikającym z niego kryzysem gospodarczym.

Amerykanie dokonali wyboru – jak wiemy, na kolejnego prezydenta wybrali Ronalda Reagana. Jego polityka w wielu aspektach była przeciwieństwem podejścia Cartera. Dla Reagana rozwój gospodarki miał absolutny priorytet, a jego poglądy odnośnie przyrody dobrze oddają takie jego wypowiedzi jak: *jeśli widziałeś(aś) jedno drzewo, to tak jakbyś widział(a) wszystkie* (ang. *If you've seen one redwood tree, you've seen them all*) czy *drzewa powodują więcej zanieczyszczeń niż samochody* (ang. *trees cause more pollution than automobiles do*).

I znów, ten wybór prezydenta w USA jest znamienny dla nastrojów w tamtym okresie również w innych krajach rozwiniętych gospodarczo – w Europie Zachodniej, Kanadzie, Australii. W latach 80. zakończył się kryzys paliwowy, powrócił szybki wzrost gospodarczy, optymizm konsumencki i stopniowo zapomniano o zagrożeniach związanych z negatywnym wpływem odpadów i emisji gazów cieplarnianych czy o pracach Klubu Rzymskiego ostrzegających, że wykładniczy wzrost gospodarczy nie może trwać wiecznie.

Także większość ekonomistów nie zwracała uwagi na te zagrożenia. Kluczowym zagadnieniem, którym zajmowali się w tamtym czasie ekonomiści, było poszukiwanie metod przyspieszenia wzrostu gospodarczego i trwałego utrzymania go w czasie. Ta opinia może być krytykowana przez ekonomistów, ale z dalszej perspektywy widać, że większość zagadnień, którymi ekonomia zajmuje się od połowy XX wieku, takich jak polityka fiskalna, polityka monetarna, migracje ludności, różnice dochodowe między regionami, poziom zatrudnienia, transfery socjalne, a także stan środowiska naturalnego, było (i nadal jest) analizowane przede wszystkim w kontekście ich wpływu na tempo rozwoju gospodarki. Za taki stan rzeczy odpowiadają nie tylko ekonomiści, ale – może nawet w głównym stopniu – ludzie, którzy często wyżej cenią bogacenie się niż dbanie o przyrodę i zgodnie z takimi preferencjami dokonują decyzji wyborczych.



➔ Kryzys paliwowy, USA.
Maksymalna ilość sprzedawanego paliwa to 10 galonów.

WZROST WYKŁADNICZY

Prof. Albert Bartlett (1923–2013) to profesor fizyki, który uważał, że:

Największym ograniczeniem rasy ludzkiej jest niezdolność do zrozumienia funkcji wykładniczej.

ang. *The greatest shortcoming of the human race is our inability to understand the exponential function.*

Przez całą swoją karierę naukową starał się wyjaśnić ludziom, w jak najbardziej przystępny sposób, na czym polega funkcja wykładnicza. Swoją wykład na ten temat wygłosił 1742 razy.



Jeden z wykładów można zobaczyć tu:

“Arithmetic, Population and Energy” – a talk by Al Bartlett »

W środowisku ekonomicznym silny głos wzywający do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych ponownie pojawił się w 2006 roku, gdy zespół kierowany przez Nicolasa Sterna przedstawił obszerny, ponad 600 stronicowy raport analizujący wpływ zmiany klimatu na światową gospodarkę.

Raport stwierdzał, że należy jak najszybciej podjąć zdecydowane działania ograniczające poziom emisji gazów cieplarnianych, ponieważ korzyści płynące z podjęcia działań zapobiegających zmianie klimatu są znacznie większe niż ich koszty, a sama zmiana klimatu wiąże się z ogromnym, trudnym obecnie do dokładnego oszacowania ryzykiem. Przyszłe koszty ekonomiczne spowodowane zmianą klimatu szacowano w zakresie od 5% aż do 20% światowego PKB rocznie, natomiast koszt działań zapobiegawczych określono na poziomie 1-2% światowego PKB.

Reakcje na raport zespołu Sterna były zróżnicowane. Dla części decydentów był on ważnym argumentem motywującym do podjęcia działań ograniczających zmianę klimatu. Np. ówczesny premier Wielkiej Brytanii, Tony Blair powiedział „Jeśli nie sprostamy temu wyzwaniu, nie wierzę, że będziemy w stanie wytłumaczyć się przyszłym pokoleniom, które zawiedliśmy.” Pojawiały się również liczne głosy krytyczne, oskarżające autorów raportu o nadmiernie alarmistyczny ton (np. Bjorn Lomborg, 2006) lub sugerujące, że w istocie raport został przygotowany po to, aby uzasadnić podniesienie podatków od paliw (Daily Telegraph, Ruth Lea, 2006). Środowisko ekonomiczne również było podzielone w ocenie raportu. Część ekonomistów oceniła go pozytywnie (np. R. Solow, J. Mirrelees, J. Stiglitz, J. Sachs), ale znaczna część oceniła raport negatywnie. Najczęściej krytykowano zbyt niski poziom stopy dyskontowej przyjęty w raporcie, czyli parametr który określa w jakim stopniu pomniejszamy obecną wartość przyszłych strat. William Nordhaus w swojej recenzji raportu zespołu Sterna argumentował, że jednym z głównych wniosków płynących z badań oceniających ekonomiczną opłacalność ograniczania zmiany klimatu jest, że w najbliższych latach należy ograniczać emisje gazów cieplarnianych tylko w niewielkim stopniu, a w kolejnych dekadach te ograniczenia należy stopniowo zwiększać. Dlatego Nordhaus uważał, że główny wniosek płynący z raportu, mówiący, że emisje gazów cieplarnianych należy zmniejszać już teraz, jest sprzeczny z ustaleniami współczesnej ekonomii (Nordhaus, 2007).

W odpowiedzi na tę krytykę oraz oceniając raport z perspektywy kilku lat, Nicolas Stern na Światowym Forum Ekonomicznym w 2013 roku powiedział: „Patrząc wstecz, nie doceniłem ryzyka. Wydaje się, że planeta i atmosfera pochłaniają mniej dwutlenku węgla, niż się spodziewaliśmy, a emisje szybko rosną. Niektóre z prognozowanych skutków pojawiają się szybciej, niż wtedy myśleliśmy.” Jego zdaniem, nie ograniczając emisji gazów cieplarnianych, świat jest na ścieżce w kierunku podniesienia średniej temperatury o 4 °C.



Pełna treść raportu zespołu Sterna, 2006 »



Recenzja raportu zespołu Sterna, napisana przez W. Nordhaus:

William Nordhaus, A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change »

NAGRODA NOBLA DLA WILLIAMA NORDHAUSA

William Nordhaus jest wybitnym ekonomistą, który już od lat 70. podejmuje temat związków gospodarki i globalnego ocieplenia. Jest autorem szeregu książek na ten temat, a od 1985 roku wspólnie z Paulem Samuelsonem jest autorem bardzo popularnego podręcznika do ekonomii („Ekonomia” – 19 edycji od 1948 roku, w 17 językach). Wiemy, że Nordhaus powinien być świadomy negatywnego oddziaływania gospodarki na środowisko oraz rozumieć, jakie ograniczenia ma ocenianie sukcesu ekonomicznego wyłącznie za pomocą tempa wzrostu gospodarczego. Sam opisywał to już w 1972 roku, w artykule „*Is Growth Obsolete?*” (pl. „Czy Wzrost jest przestarzały?”) i do dziś prezentuje podobne poglądy w wystąpieniach na temat ekonomii i środowiska.

To właśnie on, w pracy z 1975 roku, **jako pierwszy zaproponował górny limit dopuszczalnego ocieplenia klimatu w odniesieniu do czasów przedprzemysłowych**. Założył, że zmiana temperatury powinna się mieścić w zakresie obserwowanym w ciągu ostatnich kilkuset tysięcy lat i uznał, że wzrost temperatury o 2-3°C w odniesieniu do czasów przedprzemysłowych powinien być górnym limitem dopuszczalnego zakresu zmian. Nordhaus podkreślał, że zaproponowany przez niego standard (2°C) należy traktować bardzo umownie, bo on sam miał duże zastrzeżenia, co do procesu prowadzącego do jego ustalenia. Jednak z upływem czasu limit 2°C był coraz częściej przyjmowany za obowiązujący, a Nordhaus został powszechnie uznany za osobę, która pierwsza ten limit określiła.

W kolejnych dekadach Nordhaus dalej zajmował się tematem wpływu globalnego ocieplenia na wzrost gospodarczy, a przygotowane przez jego zespół analizy są jednymi z najważniejszych prac w tym temacie we współczesnej ekonomii. Z punktu widzenia niniejszego kursu, szczególnie istotne są rozwijane od lat 90. XX w. modele DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy model) opisujące związki między gospodarką a skalą zmian klimatycznych.

Czytając uzasadnienie Akademii, przyznającej w 2018 roku nagrodę Nobla Nordhausowi i Romerowi (drugi ekonomista, który tego roku dostał nagrodę), widzimy, dlaczego jego prace zdobyły szczególne uznanie:

Jako pierwszy stworzył model ilościowy, który opisał wzajemną zależność między gospodarką a klimatem.

(William D. Nordhaus has pioneered a framework for understanding how the economy and climate of our planet are mutually dependent on each other.)

oraz

(...) obaj kandydaci wprowadzili wiedzę i przyrodę do sfery analizy ekonomicznej i sprawili, że stały się jej integralną częścią.

(...the two laureates have brought knowledge and nature into the realm of economic analysis and made them an integral part of the endeavour.)



WILLIAM NORDHAUS
nagroda Nobla za 2018
w dziedzinie ekonomii



William Nordhaus:
The Economics
of Climate
Change »



Uzasadnienie Akademii,
przyznającej nagrody Nobla
z dziedziny Ekonomii
w 2018 roku »

WILLIAM NORDHAUS

Niezależnie od tego, czy rzeczywiście to prace Nordhause i Romera jako pierwsze wprowadziły (ponownie) przyrodę do analizy ekonomicznej, właśnie to było zdaniem Akademii w nich wyjątkowe i zasługiwało na nagrodę. I rzeczywiście, należy doceniać Nordhause za to, że niejako „przetłumaczył” argumenty naukowców zajmujących się klimatem od strony przyrody (biologów, fizyków) na język ekonomii. Poprzez stworzenie modelu, który pozwala wyrazić efekty zmiany klimatu w wartościach finansowych, ekonomiści zostali bliżej włączeni w prace nad tym zjawiskiem.

Jednak model DICE opracowany przez Nordhause spotkał się z uzasadnioną krytyką znacznej części naukowców zajmujących się zmianą klimatu. Zarzuca się mu zbyt daleko idące uproszczenia, prowadzące do skrajnego niedoszacowania wpływu globalnego ocieplenia na stan gospodarki i biosfery. Jest to tym bardziej zaskakujące, że powinien być świadomy zagrożenia ze strony zmiany klimatu i wpływu swoich prac na działania rządów wielu krajów.

Możemy tu zacytować samego Nordhause, który w trakcie prezentacji wygłoszonej po otrzymaniu nagrody Nobla powiedział:



Prof. Steve Keen,
Krytyczna analiza
modelu DICE »

„Wspólnym celem międzynarodowych negocjacji i polityk jest ograniczenie temperatury do 2°C powyżej poziomu sprzed epoki przemysłowej. **Szacuje się, że może to kosztować około 4% naszych dochodów w ciągu następnego stulecia lub dwóch. Może to być dobre dla natury, ale w rzeczywistości nie jest to tak atrakcyjne dla wyborców, aby obniżyć ich dochody tak drastycznie...**

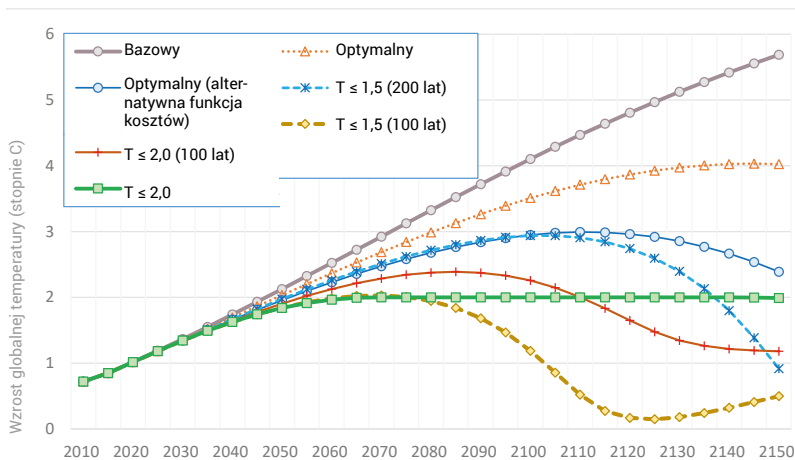
A common goal of the international negotiations and policies is to limit temperature to 2°C above pre-industrial levels and estimates are that that would might cost about 4% of our income over the next century or two. This may be good for nature but it's not actually all that attractive to voters to reduce their income that sharply...

(Prezentacja po otrzymaniu nagrody Nobla, 9 grudnia 2018)

Takie słowa zaskakują. Jak to możliwe, że Nordhaus uznaje 4% dochodu za zbyt wysoki koszt, aby zapobiec negatywnym skutkom zmiany klimatu?

W czasie tej prezentacji Nordhaus przedstawił wykres pokazujący, jak będzie się zmieniać średnia temperatura w miarę upływu czasu, zakładając różne podejścia do ograniczania emisji gazów cieplarnianych. Jak widać na wykresie zamieszczonym poniżej, w scenariuszu uznanym za „Optymalny” temperatura rośnie o 4°C, co jest wartością uznaną przez środowisko naukowe reprezentowane przez IPCC za wartość zdecydowanie wykraczającą poza bezpieczny poziom. Wzrost temperatury o 4°C zgodnie z raportami IPCC oznacza katastrofalne zmiany na Ziemi, zagrażające istnieniu życia w formie, jaką znamy (poprzez spowolnienie cyrkulacji oceanicznej, odtlenianie oceanów, załamanie się rolnictwa i wiele innych zjawisk szerzej opisanych w innych lekcjach). W raportach IPCC taki wzrost temperatury pojawia się w najbardziej pesymistycznym scenariuszu – RCP8.5 (więcej na ten temat w kolejnych lekcjach) – zakładającym brak działań ograniczających zmianę klimatu (tzw. „business as usual”).

Zmiana temperatury w zależności od działań ograniczających zmianę klimatu.



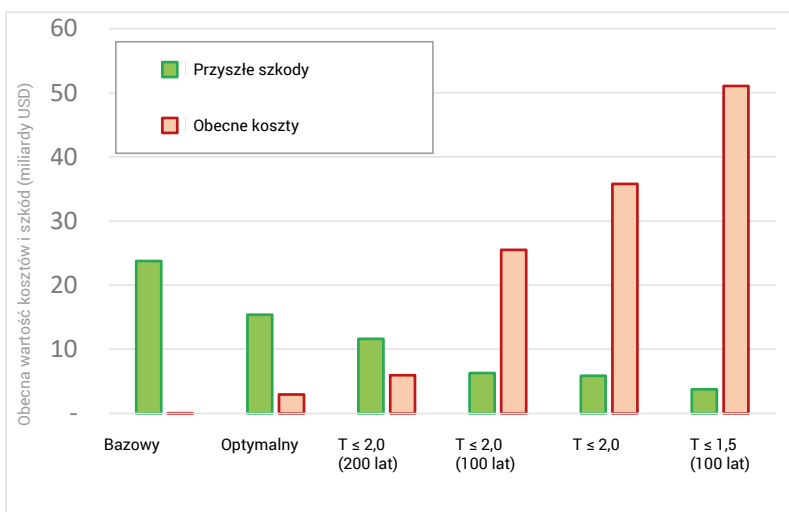
Rysunek 1. Slajd nr 6 z prezentacji „Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics” W. Nordhaua wygłoszonej po otrzymaniu nagrody Nobla w 2018 r.

źródło: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/nordhaus-slides.pdf>

Dlaczego tak wysoki wzrost temperatury jest uznany przez laureata nagrody Nobla za optymalny? Wynika to z przeprowadzonej analizy kosztów i korzyści, przedstawionej na kolejnym wykresie, przedstawiającym różne scenariusze: „Bazowy” (nie zapobiegamy zmianom klimatu), „Optymalny” (zapobiegamy, ale w niewielkim stopniu), oraz scenariusze dla sytuacji, gdy emisje gazów cieplarnianych są ograniczone tak, aby maksymalny wzrost temperatury nie przekraczał 2°C (w różnych perspektywach czasowych) lub 1,5°C. Zielone słupki oznaczają koszty, które poniesiemy w przyszłości z powodu negatywnych efektów zmian klimatu, a czerwone oznaczają koszty, które trzeba ponieść teraz, aby dany scenariusz zrealizować.

Na podstawie tych danych, zdaniem Nordhaua, nie należy istotnie ograniczać zmiany klimatu, bo koszty zapobiegania jej są wyższe niż potencjalne korzyści w przyszłości. Jego zdaniem, należy ograniczać zmianę klimatu tylko trochę (scenariusz „Optymalny”), bo wtedy łączne koszty poniesione dziś i koszty wynikające ze szkód wywołanych zmianą klimatu w przyszłości są najniższe.

Koszty zapobiegania oraz szkody, przy różnych działaniach ograniczających zmianę klimatu.



Rysunek 2. Slajd nr 7 z prezentacji „Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics” W. Nordhaua wygłoszonej po otrzymaniu nagrody Nobla w 2018 r.

źródło: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/10/nordhaus-slides.pdf>

Z takim podejściem całkowicie nie zgadza się znaczna część naukowców zajmujących się klimatem. Prof. Steve Keen argumentuje, że nie można budować modelu oceniającego przyszły wpływ dużych zmian temperatury na gospodarkę na podstawie relacji pomiędzy temperaturą a PKB, które występują dziś. Taka analiza pomija fakt, że ekosystemy planety zaczynają inaczej funkcjonować, gdy temperatura się zmienia i istniejące dziś zależności przestają obowiązywać. Klimatolodzy zwracają uwagę, że zmiana klimatu wiąże się z dużym prawdopodobieństwem wystąpienia gwałtownych, skokowych zmian w funkcjonowaniu podstawowych systemów regulujących klimat Ziemi, takich jak np. zniknięcie pokrywy lodowej na biegunie północnym czy spowolnienie lub wręcz zatrzymanie Prądu Zatokowego.

Ponadto, wg modelu DICE, jedyny efekt zmiany klimatu to wzrost średniej temperatury, a wszystkie inne parametry klimatyczne, pozostają bez zmian. Jest to bardzo istotne uproszczenie, zakładające, że poszczególne strefy klimatyczne zmieniają jedynie swój obszar występowania, ale jakościowo pozostaną takie same. Model DICE zbudowano na danych o zależnościach pomiędzy poziomem dochodów, a temperaturą występującą obecnie w różnych rejonach świata. Te dane wykazały słabą zależność pomiędzy tymi zmiennymi. Przyjęto, że ta sama zależność będzie prawidłowo opisywać wpływ przyszłej zmiany klimatu na gospodarkę.

Zaprezentowany przez Nordhousa model DICE, w uznanym za optymalny scenariuszu wzrostu temperatury o 4°C, prognozuje zmniejszenie światowej gospodarki jedynie o 3,6%. Jak nierealistyczne są te założenia, widać, zestawiając je z danymi o średniej temperaturze w czasie ostatniej epoki lodowej. Matematyczna formuła modelu DICE zakłada takie same szkody dla gospodarki, niezależnie od tego, czy temperatura rośnie, czy spada.

Temperatura w czasie epoki lodowej była niższa o ok. 4°C niż dziś, zatem w tym przypadku model również powinien prognozować spadek PKB o 3,6%. Oczywiście nie wiemy i nie możemy sprawdzić, jaki wpływ taki spadek temperatury miałby na gospodarkę, ale wiemy, że w tym czasie tereny Europy na północ od Berlina oraz Ameryki na północ od Nowego Jorku pokryte były warstwą lodu o kilometrowej grubości. To pokazuje skalę zmian w ekosystemach, jaką wywołuje zmiana temperatury o 4°C i naprawdę trudno przypuszczać, że ich wpływ na gospodarkę byłby tak ograniczony.

Bardzo ważnym zarzutem wobec prac Nordhousa jest ich realny wpływ na reakcje rządów na zmianę klimatu. Zdaniem naukowców zajmujących się klimatem, takie opracowania, jak opisany wyżej model DICE, w praktyce legitymizują brak działania jako właściwą reakcję na katastrofalną zmianę klimatu. Nadają wzrostowi gospodarczemu najwyższy priorytet, a deprecjonują egzystencjalne zagrożenia będące konsekwencją katastrofy klimatycznej.

Uproszczone analizy, nieuwzględniające podstawowej wiedzy o fizycznych mechanizmach sterujących klimatem Ziemi oraz o wrażliwości ekosystemów na zmiany temperatur, prowadzą do wyników, które dają złudne poczucie bezpieczeństwa, a dla decydentów stają się wygodną wymówką do ignorowania zagrożenia.



Prof. Steve Keen's presentation „Flawed Approaches (and a New Approach) to Environmental Challenges” at the OECD Conference „Averting Systemic Collapse” in Paris on September 18th 2019 »



Artykuł naukowy opisujący świat ostatniej epoki lodowej.

N. Ray, J. Adams. A GIS-based Vegetation Map of the World at the Last Glacial Maximum (25,000-15,000 BP) »



Zagadnienie dotyczące świata cieplejszego o 4°C, znajdziesz na stronie 13 tej lekcji.



Artykuł uzupełniający:

O niedocenianiu rzeczywistych kosztów gospodarczych zmian klimatycznych przez ekonomistów »

Suma wyemitowanego CO₂ od lat 70. XX wieku do chwili obecnej jest większa niż suma wszystkich emisji do roku 1970. Czyli w okresie, gdy wiedza o negatywnym wpływie rosnącego stężenia gazów cieplarnianych na klimat i biosferę była dobrze znana, gospodarka światowa wypuściła do atmosfery więcej CO₂ niż w całym wcześniejszym okresie.

Od początku prowadzenia pomiarów stężenia CO₂ wzrasta ono w coraz większym tempie.



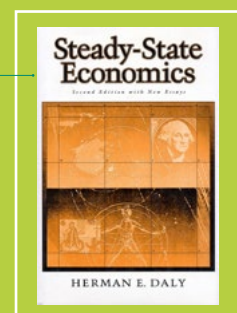
źródło: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gldata.html>

EKONOMIA EKOLOGICZNA

Nurtem w ekonomii, o którym należy koniecznie szerzej opowiedzieć, jest ekonomia ekologiczna. Uznaje się, że jej głównym założycielem jest prof. Herman Daly, który od lat 70. XX w. rozwija koncepcję gospodarki znajdującej się w stanie stacjonarnym (ang. *steady-state economy*). Podstawowym założeniem, jakie przyjmuje Daly, jest to, że gospodarka stworzona przez człowieka jest podsystemem globalnej biosfery, a nie na odwrót (*The economy is a wholly owned subsidiary of the environment, not the reverse*). Wynika z tego logiczny wniosek, że maksymalna wielkość gospodarki jest ograniczona przez skończoną pojemność biosfery, w której funkcjonuje.

Konkluzja z tego toku myślenia jest rewolucyjna z punktu widzenia dominującej obecnie ekonomii, skupionej na wspomaganiu tempa rozwoju. Oznacza to bowiem, że nieskończony wzrost nie jest możliwy z powodu ograniczonej pojemności naszej planety. Jednak koncepcja stacjonarnego stanu gospodarki nie jest nowa i wcale nie jest aż tak kontrowersyjna, jak się w dzisiejszych czasach wydaje. Klasycy myśli ekonomicznej zakładali, że wzrost ekonomiczny się zatrzyma, gdy gospodarka wykorzysta w pełni dostępne jej zasoby, a populacja osiągnie taką wielkość, jaką jest w stanie utrzymać zajmowany przez nią teren. Takie poglądy można znaleźć u Adama Smitha, Davida Ricardo czy Johna Stuarta Milla. Również patrząc na historię ludzkości z nieco większej perspektywy czasowej, wyraźnie widać, że wzrost gospodarczy nie jest normą, lecz raczej wyjątkowym stanem, który zaczął się wraz z rewolucją przemysłową i zdecydowanie przyspieszył po zakończeniu II wojny światowej.

Herman Daly, mówiąc o celach działalności gospodarczej człowieka, wyraźnie oddziela pojęcia jakościowego rozwoju i ilościowego wzrostu. Postuluje, że ludzkość powinna nauczyć się rozwijać jakościowo, w ramach gospodarki znajdującej się w stanie stacjonarnym, czyli takiej, która co roku zużywa taką samą ilość surowców naturalnych, energii, żywności itd. W takim stacjonarnym ilościowo stanie można rozwijać się poprzez wydajniejsze, jakościowo lepsze wykorzystanie skończonej puli zasobów. Jest to możliwe, ale wymaga użycia innych miar sukcesu niż tempo wzrostu. Jako alternatywną miarę Daly



HERMAN DALY

ur. 1938 r. Ekonomista Banku Światowego, twórca nurtu Ekonomii Ekologicznej, laureat wielu prestiżowych nagród.

Uważa, że wzrost gospodarczy nie może trwać wiecznie. Opracował i szczegółowo opisał założenia gospodarki znajdującej się w stanie stacjonarnym.

wspólnie z Johnem Cobbem uznali Indeks Trwałego Ekonomicznego Dobrobytu (Index of Sustainable Economic Welfare), uwzględniający obok poziomu konsumpcji takie wymiary jak poziom oszczędności, jakość usług, zużycie zasobów naturalnych czy jakość środowiska.

Alternatywą dla stacjonarnego stanu gospodarki jest ilościowa ekspansja, trwająca do momentu przekroczenia pojemności środowiskowej planety. Już w tej chwili, zdaniem Dalego, utrzymywanie wzrostu wymaga korzystania z zasobów środowiska naturalnego (takich jak surowce mineralne, ekosystemy czy paliwa kopalne), które są więcej warte niż wygenerowany tym wzrostem kapitał. Gospodarka znajdująca się w takim stanie, czyli zbyt duża, produkuje więcej negatywnych efektów zewnętrznych (w postaci zanieczyszczeń, odpadów, zniszczonych ekosystemów i zużycia nieodnawialnych surowców) niż wartościowych dóbr. Zatem w całkowitym bilansie stajemy się biedniejsi, a nie bogatsi. Utrzymywanie ilościowego wzrostu gospodarki, która jest już zbyt duża w porównaniu do biosfery, w której istnieje, jest w krótkim okresie niemądre, bo prowadzi do obniżenia jakości życia, a w długim okresie jest niemożliwe.

Kolejną osobą, która istotnie przyczyniła się do rozwoju ekonomii ekologicznej, jest William Rees, profesor Uniwersytetu w British Columbia w Kanadzie. Jest twórcą pojęcia „śladu ekologicznego” (ang. *ecological footprint*), które mierzy, jakiej wielkości biologicznie produktywny obszar jest potrzebny, aby zaspokoić konsumpcyjne potrzeby ludzi. Za pomocą tego pojęcia można ocenić, w jakim stopniu ludzie obciążają ekosystemy Ziemi lub – patrząc na to z drugiej strony – jak bardzo ludzie są zależni od natury. Miara ta jest różna dla poszczególnych krajów świata – w części z nich pojemność środowiska jest większa niż „ślad ekologiczny” wszystkich mieszkańców, a w części z nich jest odwrotnie. W sumie, szacuje się (według danych z 2014 roku), że ludzkość wykorzystuje zasoby naturalne Ziemi szybciej, niż wynosi naturalne tempo ich odnawiania się. Jak to jest możliwe? Oznacza to, że zasoby odnawialne są wykorzystywane zbyt intensywnie – np. skala połowu ryb przewyższa ich roczny przyrost, więcej lasów jest wycinanych lub wypalanych, niż ich co roku przybywa itd. Prof. Rees szacuje, że ludzkość już w tej chwili przekracza o około 30% pojemność środowiskową Ziemi, zatem wyczerpuje zapasy „naturalnego kapitału”.

Jak widać, ekonomia ekologiczna nie zajmuje się tylko negatywnymi skutkami zmian klimatycznych, ale ocenia oddziaływanie gospodarki na środowisko w sposób kompleksowy, traktując zmiany klimatyczne jako ważny, ale tylko jeden z szeregu negatywnych efektów. Jej przedstawiciele uważają, że celem rozwoju gospodarczego nie powinien być wyłącznie ilościowy wzrost gospodarki, ale rozwój dający ludziom większe poczucie satysfakcji z życia i szczęście. Zakładają, że aby to osiągnąć, nie wystarczy tylko coraz wyższy poziom konsumpcji dóbr materialnych, ale trzeba też wziąć pod uwagę inne aspekty życia, na które stale rozrastająca się gospodarka przemysłowa może negatywnie wpływać.

O ZNACZENIU WARTOŚCI, NORM SPOŁECZNYCH ORAZ PRAWA

Cele życiowe i wartości, które wyznajemy, są nadrzędną siłą kierującą naszymi działaniami. To, do czego dążymy, jest zależne od tego, co uznajemy w życiu



Herman Daly (2005)
Economics in a full world »



WILLIAM E. REES

ur. 1943 r. Profesor Uniwersytetu w British Columbia w Kanadzie. Zajmuje ekonomią ekologiczną, dynamiką globalnych zmian oraz ekologicznymi podstawami cywilizacji.

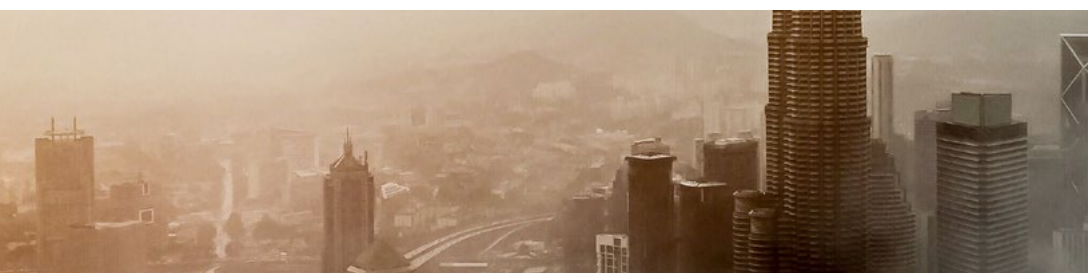


Wystąpienie prof. Wiliama Reesa prezentujące, czym zajmuje się ekonomia ekologiczna, znajduje się tu »

za sukces. Obecnie dominującym wzorem, do którego aspiruje większość ludzi, jest jak najwyższy poziom konsumpcji. Bogactwo definiowane przez drogie przedmioty, duże domy i wakacje w odległych miejscach jest modelem życiowego sukcesu prezentowanym w mediach i kulturze.

Dlatego trudno się dziwić, że w głównym nurcie postaw wobec zmian klimatycznych znajduje się podejście tych ekonomistów, którzy dążą do wysokiego wzrostu gospodarczego, a nie tych, którzy cenią trwałość i bezpieczeństwo biosfery. Dopóki większość ludzi stara się w życiu osiągnąć przede wszystkim wysoki poziom konsumpcji, trudno jest skutecznie wprowadzać w życie rozwiązania pozwalające na uniknięcie katastrofy ekologicznej wywołanej zbyt dużym obciążeniem ekosystemów Ziemi działalnością przemysłową człowieka.

Wartości, które wyznajemy, obowiązują równolegle do formalnie obowiązującego prawa: podatków, regulacji prawnych czy kar. Zastanawiając się, jak można kształtować odpowiedzialne zasady społeczne, należy pamiętać, że prawo w dłuższym okresie kształtuje postawy ludzi. Badania naukowe pokazują, że rozporządzenia prawne w miarę upływu czasu stają się nowymi, wyznawanymi przez ludzi wartościami i preferencjami. Przykładem takiego oddziaływania prawnej regulacji może być nakaz sortowania śmieci, który początkowo był zewnętrznym przymusem, modyfikującym zachowanie ludzi, ale w miarę upływu czasu stał się dla wielu osób zasadą, uznawaną za słuszną i niezależną od obowiązującego prawa. Dlatego ważne jest wdrażanie przepisów, które wspierają odpowiedzialne ekologicznie zachowania, bo wzmacnia to wartości zgodne z takim zachowaniem. Rozwiązania systemowe są potrzebne również dlatego, że klimat i środowisko są dobrami publicznymi (o czym pisaliśmy w lekcji 5) i skuteczne dbanie o nie wymaga skoordynowanych, wspólnych działań.



Godne uznania jest, że w podobnym tonie wypowiada się obecny papież Franciszek, który jest moralnym autorytetem dla wierzących katolików, a często jego opinia jest też brana pod uwagę przez osoby innych religii lub niewierzące. Ze względu na pełnioną funkcję ma on prawo, a wręcz powinność, aby w obecnej sytuacji odwołać się do wartości, które kierują działaniami ludzi. W opublikowanej w 2015 roku encyklice *„Laudato Si’ W trosce o wspólny dom”* przywołuje słowa swoich poprzedników, nawołujące do troski o stan środowiska naturalnego. Sam bardzo dokładnie opisuje, w jaki sposób gospodarcza działalność człowieka niszczy środowisko Ziemi oraz szczegółowo i zgodnie z aktualną wiedzą naukową przedstawia mechanizm prowadzący do globalnego ocieplenia. Co ważne, nie tylko opisuje problem, ale też wzywa do działania osoby odpowiedzialne za kształtowanie społecznych i prawnych ram, w których funkcjonujemy.

”

Po okresie irracjonalnej wiary w postęp i ludzkie możliwości część społeczeństwa wkracza w etap głębszej świadomości. Dostrzegamy rosnącą wrażliwość na środowisko i troskę o przyrodę oraz szczerą i pełną bólu obawę o to, co się dzieje z naszą planetą [19].

Wielu z tych, którzy mają więcej środków oraz władzy gospodarczej i politycznej, zdaje się koncentrować głównie na maskowaniu problemów lub ukrywaniu objawów, starając się jedynie o ograniczenie negatywnych skutków zmian klimatycznych. Wiele jednak symptomów wskazuje, że skutki te mogą być coraz gorsze, jeśli będziemy kontynuować aktualne modele produkcji i konsumpcji. Dlatego pilne i konieczne stało się prowadzenie takiej polityki, aby w nadchodzących latach emisja dwutlenku węgla i innych gazów zanieczyszczających została drastycznie zmniejszona [26].



PAPIEŻ FRANCISZEK

2015

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C - ĆWICZENIE

Poniższa mapa została przygotowana przez firmę FutureMap i została nam udostępniona przez jej właściciela Paraga Khanna. Pracuje on jako doradca strategiczny dużych organizacji (np. World Economic Forum czy Siły specjalnych USA). Magazyn „Esquire” wymienił go jako jednego z „75 najbardziej wpływowych ludzi XXI wieku”, a magazyn „Wired” umieścił go na swojej „Smart List”, czyli liście 15 osób, których przyszły prezydent USA powinien słuchać.

Mapa pokazuje, jak zdaniem FutureMap może wyglądać świat cieplejszy o 4°C. Pokazuje, jakie zmiany prognozują specjaliści tej firmy na podstawie wiedzy o skutkach zmiany klimatu oraz spodziewanych zmianach w sposobie produkcji energii. Zakłada, że w wyniku wzrostu średniej temperatury o 4°C obszar międzyzwrotnikowy w większości nie będzie nadawać się do zamieszkania, poziom oceanów podniesie się o 2 metry, a ludzie przeniosą się na północ, na obszary północnej Rosji, Kanady oraz na obecnie niezamieszkałe części Grenlandii czy Antarktydy.

Prognoza zakłada intensywny rozwój produkcji energii odnawialnej: ze Słońca, wiatru oraz źródeł geotermalnych. Instalacje do produkcji tej energii mają być zlokalizowane głównie na terenach nienadających się do zamieszkania, a energia ma być przesyłana w formie prądu o wysokim napięciu do zaludnionych rejonów.

Spójrz proszę na tę mapę i zastanów się, które z prognozowanych zmian są prawdopodobne, a które nie. Dlaczego? Czy Twoim zdaniem coś należałoby zmienić w tej mapie? Zastanów się nad tym, a później przeczytaj nasz komentarz do tej prognozy.

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C - ĆWICZENIE

Przejsie Arktyczne

Pozbawiona pływającego lodu, ta cenna droga jest otwarta cały rok, udostępniając połączenie transportowe pomiędzy zamieszkałymi obszarami Kanady i Rosji.

Kanada

Stabilne opady i cieplejsze temperatury dają dobre warunki wzrostu dla większości roślin uprawnych świata.

Grenlandia

Pokrywa lodowa Grenlandii będzie się gwałtownie topić.

Północna Afryka/ Bliski Wschód/ Południowe USA

Pas Energii Słonecznej rozciąga się na tysiące kilometrów, dając energię fotowoltaiczną i termalną. Prąd o wysokim napięciu jest przesyłany na północ.

Południowa Europa

Pustynie wkraczają na kontynent, rzeki wysychają, a Alpy są bezśnieżne. Na północnych krańcach obszaru hodowane są kozy i inne wytrzymałe zwierzęta.

Skandynawia/Wielka Brytania/ Północna Rosja/ Grenlandia

Zwarte miasta, z wysoką zabudową dadzą schronienie dla większości populacji.

Syberia

Stabilne opady i cieplejsze temperatury dają dobre warunki wzrostu dla większości roślin uprawnych świata.

Południowe Chiny

Osuszone rzeki i warstwy wodonośne oznaczają, że ten region został porzucony. Intensywne monsuny dodatkowo przyczyniły się do erozji gleby, zostawiając suchy pył.

Południowo-zachodnie USA

Pustynienie zmusza ostatnich mieszkańców tego regionu do migracji na północ. Rzeka Kolorado jest tylko wspomnieniem. Teren jest używany do produkcji energii z paneli słonecznych oraz geotermalnej.

Peru

Topnienie lodowców spowodowało, że ten obszar jest suchy i niezdatny do zamieszkania.

Zachodnia Antarktyda

Teraz nie do rozpoznania. Gęsto zaludniona, z pełnymi wieżowcami miastami.

Amazonia

Pustynia.

Patagonia

Topniejące lodowce odsłaniają nowe tereny dla rolnictwa, jednak słabe gleby są bardzo wymagające.

Afryka

Głównie pustynia, ale niektóre modele prognozują zazielenienie części zachodniej Sahary.

Azja

Większość lodowców w Himalajach stopiła się, co miało poważne konsekwencje dla rzek tego regionu. Bangladesz jest w większości opuszczony, podobnie jak południowe Indie, Pakistan i Afganistan. Pozostają małe, odizolowane społeczności.

Australia

Na dalekiej północy i na Tasmanii istnieją zwarte miasta oraz uprawiana jest żywność. Pozostała część kontynentu przeznaczona jest na produkcję energii słonecznej oraz kopalnie.

Polinezja

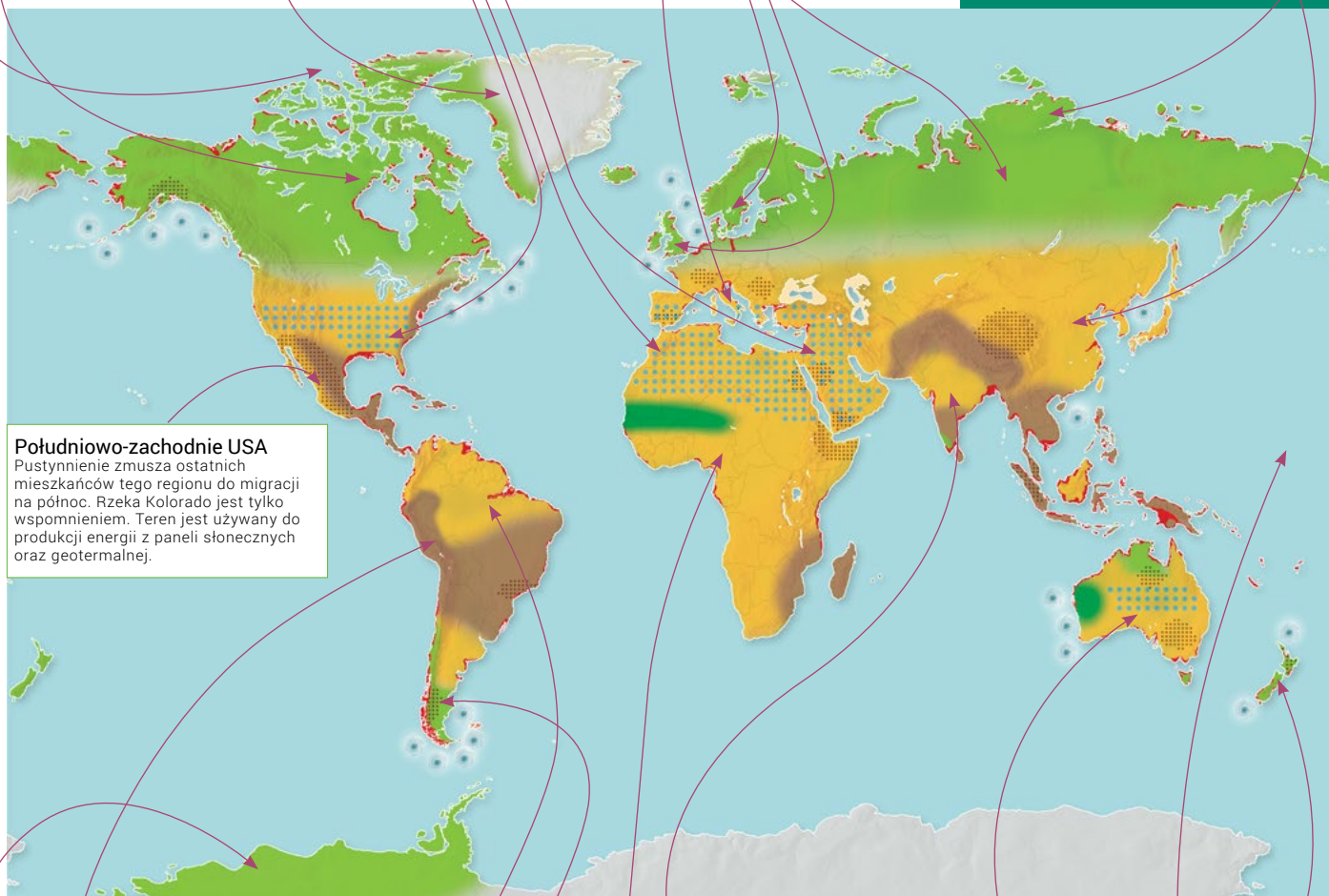
Zniknęła pod powierzchnią wody.

Nowa Zelandia

Teraz nie do rozpoznania. Ta gęsto zaludniona wyspa ma pełne wieżowców miasta i zaawansowane rolnictwo.

- Obszary uprawy rolnej/miasta
- Pustynie, niezdatne do zamieszkania
- Niezdatne do zamieszkania z powodu powodzi, suszy lub gwałtownej pogody
- Potencjał dla odtworzenia lasów

- Tereny utracone z powodu wyższego poziomu oceanów (+2 metry)
- Energia słoneczna
- Energia geotermalna
- Energia z wiatru



Rysunek 3: Mapa przedstawiająca jak świat może wyglądać, gdy średnia temperatura wzrośnie o 4°C.

Źródło: @ Connectography (2016) by Parag Khanna

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C - ĆWICZENIE

KOMENTARZ:

Ta mapa pokazuje potężne zmiany, które mogą wystąpić w wyniku zmiany klimatu. Już to, co jest na niej przedstawione, wygląda dramatycznie, ale należy zaznaczyć, że nie ma tu informacji o szeregu problemów ekologicznych, o których pisaliśmy we wcześniejszych rozdziałach kursu i które z wysokim prawdopodobieństwem mogą wystąpić przy znacznym ociepleniu planety.

Poniżej są krótkie komentarze dotyczące konkretnych zmian przedstawionych na mapie:

WZROST POZIOMU OCEANÓW

Poziom oceanów na pewno wzrośnie, obecnie wątpliwości nauki dotyczą jedynie tego, o ile metrów. Pokazana na mapie zmiana o 2 metry jest w dolnym przedziale prognozowanego zakresu. W mniej optymistycznym scenariuszu wzrost poziomu wody może być nawet o kilka metrów wyższy.

PUSTYNNIENIE OBSZARU MIĘDZYZWROTNIKOWEGO

Są to, niestety, prawdopodobne zmiany. Wzrost temperatury może spowodować pustoszczenie znacznych obszarów, obecnie pokrytych roślinnością. Należy zaznaczyć, że te niekorzystne zmiany są przyspieszane przez wypalanie i wycinanie lasów tropikalnych przez człowieka (Amazonia, Borneo, Afryka Centralna). Problem pustoszczenia nie jest niestety ograniczony wyłącznie do obszaru międzyzwrotnikowego. Widać to np. w Polsce, gdzie zmiany w występowaniu opadów i nasilenie parowania prowadzą do pogłębiania się suszy i ryzyka stepowienia, a nawet pustoszczenia znacznych obszarów.

PRZENIESIENIE ROLNICTWA NA TERENY POŁOŻONE NA DALEKIEJ PÓŁNOCY I NA FRAGMENTY GRENLANDII I ANTARKTYDY

Prawdopodobieństwo takiej zmiany jest wysoce wątpliwe. Podstawowym ograniczeniem terenów położonych blisko biegunów jest mniejsza dostępność światła – przez znaczną część roku panuje tam noc, a w okresie letnim Słońce jest nisko nad horyzontem i oświetlenie jest mniej intensywne niż na obszarach położonych bliżej równika.

Nie ma naukowych podstaw, aby sądzić, że możliwe będzie wykorzystanie rolnicze znaczących fragmentów Grenlandii czy Antarktydy. W przypadku Kanady i północnej Rosji może to być bardzo trudne ze względu na ubogą glebę. Nie ma też gwarancji, że opady na tych obszarach będą na tyle regularnie, aby móc tam uprawiać rośliny.

MOŻLIWOŚĆ CAŁOROCZNEJ ŻEGLUGI NA OCEANIE ARKTYCZNYM

Ta zmiana jest pewna. Już teraz obserwujemy, że okres, w którym żegluga jest możliwa, się wydłuża i wiemy, że wkrótce ten szlak wodny będzie dostępny przez cały rok.



Czego możemy oczekiwać w najgorszym przypadku, podążając drogą scenariusza wysokich emisji? Wskazówkę mogą stanowić dawne zmiany klimatu. Przeczytaj artykuł »

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C - ĆWICZENIE

**MIGRACJA LUDNOŚCI NA TERENY POŁOŻONE NA DALEKIEJ
PÓŁNOCY (KANADA, GRENLANDIA, PÓŁNOCNA ROSJA)
ORAZ NA POŁUDNIU (NOWA ZELANDIA, ZACHODNIA ANTARKTYDA)**

Jest bardzo prawdopodobne, że ludzie przeniosą się na te tereny, bo znaczna część obszaru międzyzwrotnikowego może być zbyt gorąca dla organizmu człowieka. Jednak trudno oczekiwać budowy dużych miast na Antarktydzie czy Grenlandii. Zmiana klimatu będzie się wiązała z bardzo poważnymi problemami ekonomicznymi i jest mało prawdopodobne, że gospodarka będzie funkcjonować na tyle sprawnie, aby umożliwić rozwój miast podobny do tego, jaki widzimy obecnie. Poza tym obszary, które dziś są wieloletnią zmarzliną, będą długo topnieć, co oznacza niestabilność gruntu, a to utrudnia budowę i utrzymanie infrastruktury.

TOPNIENIE LODOWCÓW W WYSOKICH GÓRACH

Ta zmiana na pewno nastąpi. Już teraz lodowce w Alpach, Himalajach i innych wysokich górach szybko się topią, co ma konsekwencje dla ludzi żyjących na terenach zasilanych w wodę rzekami powstającymi z górskich lodowców.

**POTENCJAŁ DLA ODTWORZENIA LASÓW W ZACHODNIEJ CZĘŚCI
SAHARY I AUSTRALII**

Taka zmiana jest możliwa, ale trudno określić jej prawdopodobieństwo. Jeśli rzeczywiście wystąpi, to odtworzenie lasu na tych terenach będzie trwało długo, prawdopodobnie nie mniej niż kilka stuleci.

**ROZWÓJ PRODUKCJI ENERGII ODNAWIALNEJ W OBSZARZE
MIĘDZYZWrotnIKOWYM, NA TERENACH NIENADAJĄCYCH SIĘ
DO ZAMIESZKANIA**

Jest to bardzo dyskusyjna zmiana. Idea, aby produkować energię tam, gdzie jest dużo słońca (pustynie w okolicy równika), i transportować ją na tereny zamieszkane przez ludzi, może się wydawać rozsądna. Jednak praktyczna realizacja tego pomysłu jest ograniczona przez warunki fizyczne, możliwości finansowe światowej gospodarki, dostępność surowców potrzebnych do produkcji tych instalacji czy też konieczność ustalenia trwałych, stabilnych porozumień politycznych.

Z tego powodu, produkcja energii odnawialnej w takim kształcie, jak pokazany na tej mapie, jest bardzo mało prawdopodobna. Więcej o wyzwaniach stojących przed energetyką można przeczytać w książkach Marcina Popkiewicza:



Świat na rozdrożu »

Rewolucja energetyczna:
Ale po co? »

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C - ĆWICZENIE

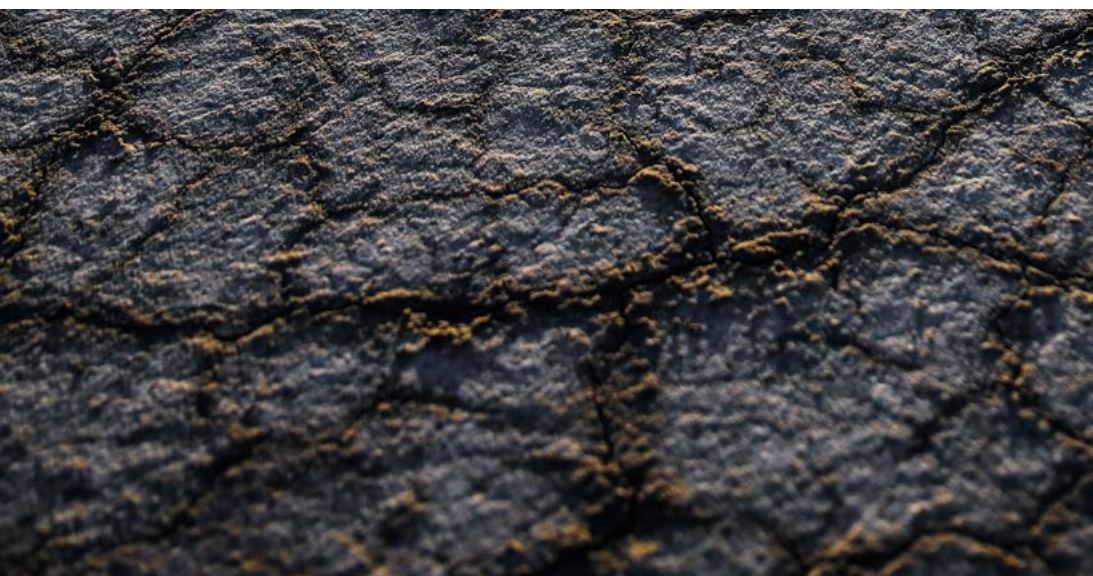
ZAKOŃCZENIE

Chociaż powyższa mapa wygląda dramatycznie, to i tak nie pokazuje wielu innych ważnych zmian, które z wysokim prawdopodobieństwem wystąpią przy tak znacznym ociepleniu planety – takich jak zatrzymanie cyrkulacji oceanicznej, zakwaszenie oceanów, zagłada raf koralowych, przyspieszenie procesu wymierania gatunków i inne.

Prognozowanie, jak świat będzie wyglądał w sytuacji ocieplenia o 4°C, jest trudne, gdyż mówimy tu o systemie na skalę planety (takim systemem jest klimat) i jego interakcji z żywymi ekosystemami, które mogą całkowicie załamać się pod wpływem zmiany klimatu, zachodzącej w tempie bez precedensu. Jednak jeszcze większe źródło niepewności wiąże się z działaniami ludzi, państw i społeczeństw w takiej sytuacji. Trudno też sobie wyobrazić, jakiej skali migracji ludzi i jakich zmian społeczno-politycznych należy się spodziewać w związku z tak dużymi przesunięciami stref klimatycznych. Śmierć nie milionów, a miliardów ludzi, jest bardzo prawdopodobna i niepodobna do niczego, co ludzkość przeżyła do tej pory.

Jeśli uważnie uczestniczyłaś/eś w dotychczasowej części kursu, wiesz także, że zmiana klimatu ma charakter progowy i istnieją w niej punkty krytyczne, których przekroczenie powoduje jej kaskadową eskalację. Wiesz także, że nie wystarczy zaprzestać emisji gazów cieplarnianych, bo te już wyemitowane będą nadal podnosić średnią temperaturę planety, aż do osiągnięcia przez cały system klimatyczny nowego punktu równowagi. Nie ma powodu, aby ocieplenie zatrzymało się nagle w punkcie 4°C. Aby tak się stało, cywilizacja ludzka musiałaby nie tylko przetrwać do tego etapu, ale także aktywnie usuwać dwutlenek węgla z atmosfery (pochodzący zarówno z bieżących, jak i z historycznych emisji).

Dlatego z punktu widzenia reprezentantów nauk ścisłych, fizyki, biologii, klimatologii, scenariusz ocieplenia o 4°C nie tylko nie jest optymalnym zakresem zmiany, ale jest czymś do czego za wszelką cenę nie wolno dopuścić.



Protokół montrealwski jako przykład skutecznego międzynarodowego porozumienia ekologicznego

Protokół montrealwski (PM) jest uznawany za najbardziej udane międzynarodowe porozumienie ekologiczne, które pozwoliło na rozwiązanie problemu „dziury ozonowej”. Porozumienie to stanowi ważny punkt odniesienia dla rozwiązywania przez społeczność międzynarodową innych problemów ekologicznych, w tym problemu globalnego ocieplenia.

Głównym celem tego opracowania jest przedstawienie czytelnikom mechanizmów, które spowodowały, że PM stał się sukcesem, oraz jakie wnioski z realizacji protokołu płyną dla międzynarodowego porozumienia klimatycznego. Opracowanie składa się z czterech części:

- w pierwszej opisujemy, czym jest warstwa ozonowa,
- w drugiej opisujemy problem niszczenia warstwy ozonowej, znany powszechnie jako tzw. „dziura ozonowa”,
- w trzeciej omawiamy mechanizmy, które sprawiły, że do podpisania Protokołu montrealskiego doszło tak łatwo,
- w ostatniej czwartej części omawiamy, jakie wnioski dla międzynarodowego porozumienia klimatycznego mogą być wyciągnięte z Protokołu montrealskiego.

CO TO JEST OZON?

Ozon tworzy się przede wszystkim w górnych warstwach atmosfery, gdzie pod wpływem promieniowania ultrafioletowego (UV) niektóre cząsteczki tlenu (O_2) są rozszczepiane na atomy (O), które reagują z cząsteczkami O_2 , tworząc cząsteczki tlenu trójatomowego (O_3), który nazywa się ozonem. Cząsteczki ozonu są z kolei częściowo rozszczepiane przez światło do atomów tlenu (O) i cząsteczek tlenu dwuatomowego (O_2). To dzięki temu ostatniemu procesowi warstwa ozonowa chroni powierzchnię Ziemi przed nadmierną ekspozycją na promieniowanie UV. W niezanieczyszczonej atmosferze dzięki równoczesnemu powstawaniu i rozkładowi cząsteczek ozonu utrzymuje się stałe stężenie tego gazu.

CO TO JEST DZIURA OZONOWA I DLACZEGO JEST SZKODLIWA?

Od lat 70. ubiegłego wieku obserwuje się znaczne zubożenie stratosferycznej warstwy ozonowej chroniącej życie na powierzchni Ziemi przed promieniowaniem ultrafioletowym. Zmniejszona grubość warstwy ozonowej ma zwłaszcza

CZY WIESZ, ŻE ?

- 📖 Atmosfera ziemska zawiera bardzo małe ilości ozonu, który znajduje się głównie w górnej atmosferze. Jest to tak zwany „dobry ozon” (stratosferyczny), który chroni nas przed promieniowaniem UV, w odróżnieniu od „złego ozonu” (troposferycznego) przy powierzchni ziemi, który pochodzi z zanieczyszczeń i jest szkodliwy (ozon jest silnym utleniaczem i powoduje uszkodzenia w żywych organizmach).
- 📖 Gdyby z górnej atmosfery wyciągnąć cały ozon, to w tzw. warunkach standardowych (czyli przy ciśnieniu 1000 hPa i temperaturze 0°C) molekuly ozonu utworzyłyby warstwę o grubości jedynie 3 mm. Grubość warstwy ozonowej podaje się zazwyczaj w specjalnej jednostce zwanej dobsonem (DU), gdzie 1 DU odpowiada grubości 10^{-5} m w warunkach standardowych.

miejsce w wysokich i średnich szerokościach geograficznych, w okresie wiosny i zimy, kiedy przewaga reakcji rozpadu ozonu nad reakcjami prowadzącymi do jego syntezy jest szczególnie widoczna. Odtwarzaniu cząstek ozonu sprzyja bowiem zwiększone natężenie promieniowania słonecznego.

W latach 70. XX wieku odkryto, że w rozbijaniu ozonu mogą brać udział związki chemiczne produkowane przez człowieka – freony (Molina i Rowland, 1974). Jak możesz pamiętać z lekcji czwartej, freony to chloro-fluoropochodne węglowodorów (po angielsku *chloro-flouro carbons*, w skrócie CFC), czyli związki powstające, gdy w węglowodorach alifatycznych (np. metanie, propanie, butanie) atomy wodoru zostaną zamienione na atomy chloru lub fluoru.

Freony to wynalazek amerykańskiego koncernu Du Pont, przez który zostały opatentowane w latach 30. XX w. Freony są bardzo trwałe, niepalne i nieszkodliwe dla człowieka, a jednocześnie łatwo można je skraplać i odparowywać. Z uwagi na swoje właściwości znalazły wiele zastosowań w chłodnictwie (lodówki, przemysłowe systemy chłodnicze) lub jako gazy nośne w puszkach aerozolowych (np. kosmetyki, farby). Ich trwałość powoduje jednak, że gdy freony dostaną się do atmosfery, to pozostają w niej bardzo długo. Rozpaść się mogą jedynie w górnej warstwie atmosfery, gdzie promieniowanie UV powoduje uwolnienie atomów chloru. Niestety w stratosferze uwolnione atomy chloru wchodzi w reakcje z cząsteczkami ozonu. W wyniku tej reakcji powstają zwykłe cząsteczki tlenu (O_2) oraz jony $ClO\cdot$. Atomy chloru w stratosferze działają jak katalizator, jeden atom chloru może zniszczyć wiele cząsteczek ozonu. W rezultacie reakcje niszczenia ozonu zaczynają przeważać nad reakcjami, w których powstaje.

Obszar, w którym grubość warstwy ozonowej spadnie poniżej 220 dobsonów, jest nazywany dziurą ozonową. Próg 220 dobsonów jest umowny, nawet jeśli nie zostaje osiągnięty, to ryzyko chorób związanych ze zwiększoną ekspozycją na UV i tak rośnie wraz z obniżeniem koncentracji ozonu. Według raportu ONZ z 1991 roku, spadek zawartości ozonu o 5% w stratosferze pociąga za sobą wzrost liczby przypadków nowotworów skóry o 26%. Ustalono również, że zmniejszenie warstwy ozonu chroniącej przed promieniowaniem UV wywołuje wiele uszkodzeń wzroku, m.in. zaćmę, a w skrajnych przypadkach nawet ślepotę. Spadek ilości ozonu zaburza ponadto łańcuch pokarmowy i zmniejsza produkcję rolną (większa ekspozycja roślin uprawnych na promieniowanie UV obniża zarówno jakość, jak i wielkość plonów), a także przyspiesza korozję.

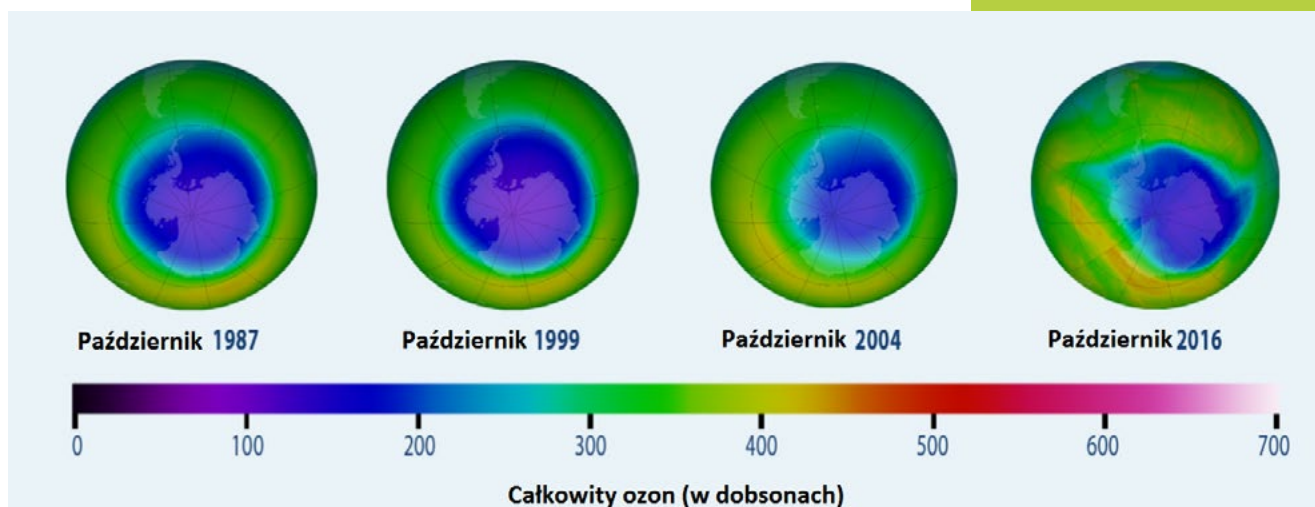
We wrześniu 2006 roku dziura ozonowa osiągnęła maksymalną, kiedykolwiek zaobserwowaną powierzchnię, równą 26,6 mln. km², co zostało przedstawione na rysunek 4 (na niebiesko zaznaczono obszar z koncentracją ozonu poniżej 220 dobsonów).

**Wywiad z prof. Mariem Moliną:**

O ozonie, klimacie i docieraniu do ludzi »



Źródło: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/dziura-ozonowa-historia-sukcesu-365> »



Rysunek 4: Dziura ozonowa nad Antarktydą w latach 1987-2016.

Źródło: TOMS science team & the Scientific Visualization Studio, NASA GSFC

Z punktu widzenia ekonomii warstwę ozonową należy traktować jako dobro publiczne. Wynika to z faktu, że lokalizacja emisji freonu nie ma znaczenia dla występującej nad danym krajem grubości warstwy ozonowej. Wyemitowana do atmosfery cząsteczka freonu, w wyniku ruchów prądów atmosferycznych, może trafić zupełnie gdzie indziej. A zatem żaden kraj nie ma zachęty do tego, aby jednostronnie wprowadzać ograniczenia w emisji freonu. Oznacza to, że w przypadku dziury ozonowej, podobnie zresztą jak w przypadku emisji gazów cieplarnianych, skuteczna walka wymaga ustanowienia globalnych limitów emisji zanieczyszczeń. Jest to ważne rozróżnienie względem na przykład zanieczyszczeń powodujących smog (tj. tlenki azotu, siarki, pyły zawieszone), w przypadku których lokalne działania bezpośrednio przekładają się na lokalną poprawę jakości powietrza.

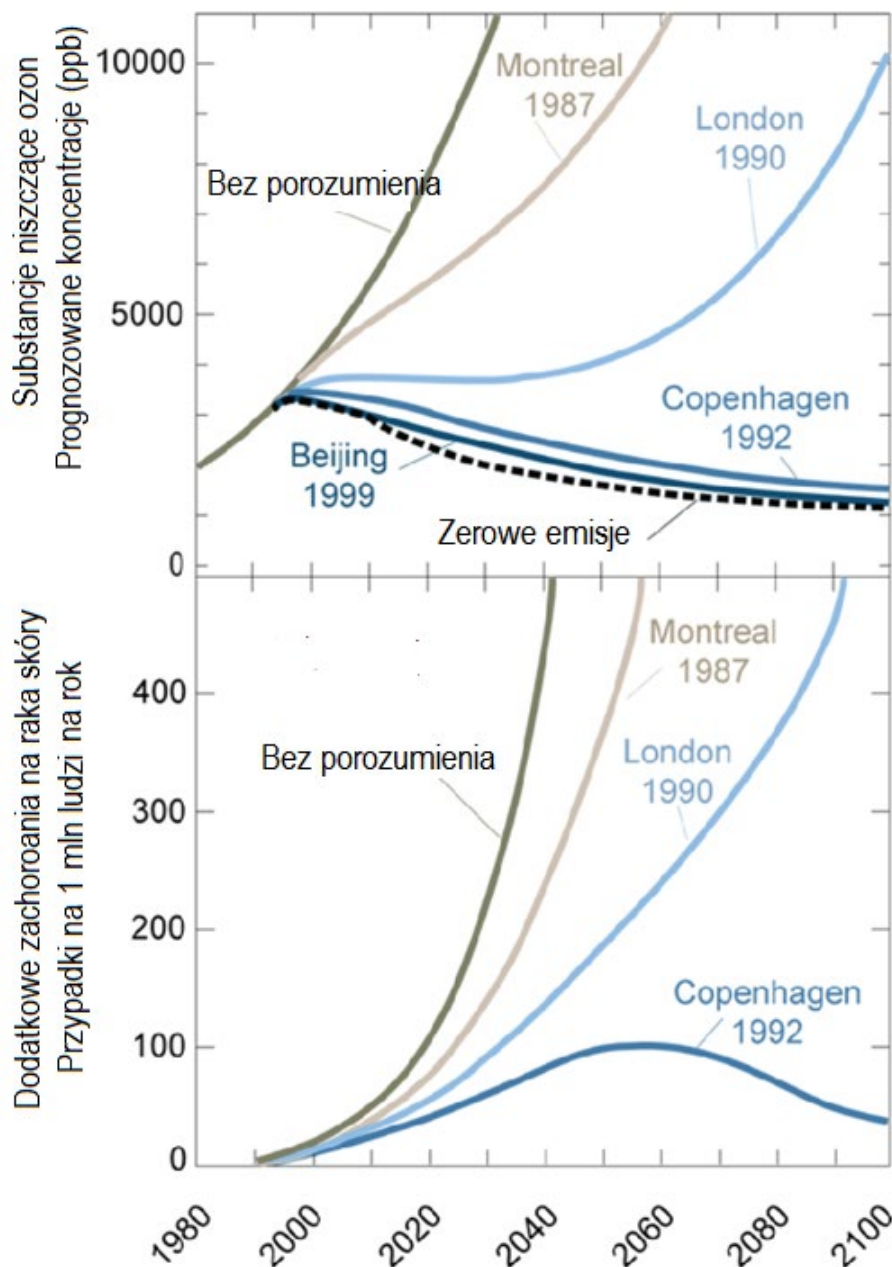
PROTOKÓŁ MONTREALSKI

W odpowiedzi na rosnącą liczbą dowodów na niszczący wpływ freonów na warstwę ozonową, w 1985 roku państwa zrzeszone w ONZ uchwaliły Konwencję Wiedeńską o ochronie warstwy ozonowej, a w 1987 roku tzw. Protokół montrealwski (protokół do tej konwencji, w skrócie PM). Dokumenty zostały ratyfikowane przez wszystkie kraje świata, które tym samym zobowiązały się do stopniowego wycofania z produkcji substancji niszczących ozon, a przede wszystkim freonów. Postanowienia protokołu były kilkakrotnie poprawiane, by ostatecznie doprowadzić do spadku koncentracji freonów w atmosferze. Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowany i oczekiwany wpływ na ozon substancji uwzględnionych w Protokole montrealskim. Czarna ciągła linia oznacza obserwacje i projekcje na przyszłość w przypadku, gdyby Protokół montrealwski nie został podpisany. Kolorowe linie pokazują prognozy przy założeniu, że protokół będzie realizowany w pierwotnym brzmieniu oraz po kolejnych poprawkach. Na rysunku poniżej przedstawiono ponadto oszacowania liczby dodatkowych zachorowań na raka skóry dla kolejnych wersji porozumienia.

Dobra publiczne zostały szczegółowo omówione w lekcji 5.



**KLIMATYCZNE
ABC**

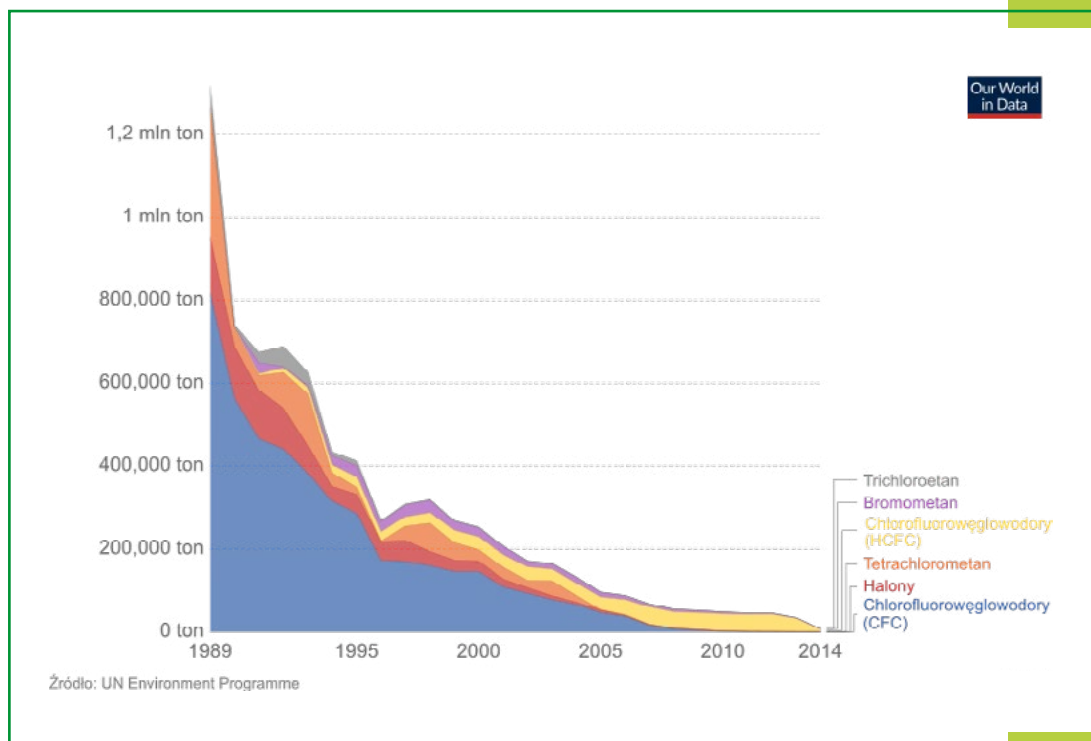


Rysunek 5: Zarejestrowany i oczekiwany wpływ na ozon substancji uwzględnionych w Protokole montreal'skim i dla kolejnych poprawek oraz dodatkowe zachorowania na raka skóry (na 1 mln mieszkańców) w różnych wariantach.

Źródło: Cancer Council Australia. Skin cancer: facts and figures. Sydney: Cancer Council Australia, www.cancer.org.au/cancersmartlifestyle/SunSmart/Skincancerfactsandfigures.html.

Przy okazji warto zauważyć, że Protokół montreal'ski znacząco zmniejszył także zagrożenie związane ze zmianą klimatu, ponieważ freony są silnymi gazami cieplarnianymi i gdyby ich dodawanie do atmosfery nie zostało zahamowane, mielibyśmy dziś do czynienia z dużo silniejszym efektem cieplarnianym.

Rysunek 6 pokazuje, jak z biegiem lat zmieniało się zużycie substancji objętych Protokołem montreal'skim. Ponieważ czas życia freonów w atmosferze jest bardzo długi, spodziewamy się jednak powolnego, trwającego kilkadziesiąt lat spadku ich wpływu na ozon. W połowie XXI wieku sytuacja powinna wrócić do stanu z lat 80. XX wieku. Pojawiły się już pierwsze opracowania wykazujące, że warstwa ozonowa zaczęła się z wolna odbudowywać, oraz wiążące ten fakt z malejącymi koncentracjami substancji niszczących ozon (Solomon i in., 2016).



Rysunek 6: Światowe użycie substancji niszczących ozon w latach 1989-2014.

Źródło: Wykres na podstawie danych UNEP za Our World in Data.

WNIOSKI PŁYNĄCE Z PROTOKOŁU MONTREALSKIEGO DLA GLOBALNEGO POROZUMIENIA KLIMATYCZNEGO

Porozumienie z Montrealu stanowi ważny punkt odniesienia dla rozwiązywania przez społeczność międzynarodową innych problemów ekologicznych, w tym problemu globalnego ocieplenia. W tej części opracowania zastanowimy się, czy i w jakiej części doświadczenia związane z PM mogą zostać wykorzystane do rozwiązania problemu globalnego ocieplenia.

Problem dziury ozonowej i globalnego ocieplenia, jeżeli chodzi o mechanizmy związane z zachowaniem biznesu, polityków i opinii publicznej, są w wielu wymiarach podobne. Aby zrozumieć dlaczego PM okazał się sukcesem, a globalne porozumienie rodzi się w bólach, przeanalizujemy teraz kalendarium wydarzeń i strategię głównych graczy.

W pierwszej połowie lat 70. zostały opublikowane pierwsze prace (Johnston, 1971; Molina i Rowland, 1974), które zaczęły wskazywać na związek pomiędzy stężeniem stratosferycznego ozonu a emisją freonów. Po ukazaniu się tych artykułów, a zwłaszcza artykułu Moliny i Rowlanda (1974), zaczęły pojawiać się prace naukowe, w dużej części sponsorowane przez firmy chemiczne, które kwestionowały negatywny wpływ freonów na warstwę ozonową. Dużo wysiłku na tym polu włożył zwłaszcza gigant chemiczny Du Pont, który był właścicielem patentu na produkcję freonu. Przygotowano akcje propagandowe skierowane do zwykłych ludzi i zniechęcające do atakowania freonów. Argumentowano, że freony są dobrodziejstwem współczesnej cywilizacji i że bez nich nie będzie możliwe normalne funkcjonowanie gospodarstw domowych (czy ktoś wyobraża sobie nowoczesne gospodarstwo domowe bez lodówki?) (Żylicz, 2016). Pomimo tych działań, do 1984 roku zdecydowana większość środowiska naukowego zgadzała się co do negatywnego wpływu freonów na niszczenie warstwy ozonowej, aczkolwiek nadal w środowisku naukowym były obecne głosy kwestionujące taki związek. W pierwszej połowie lat 80. naukow-

cy oraz organizacje ekologiczne postulowali ograniczenie lub zakaz produkcji freonów. Największym przeciwnikiem takiego rozwiązania pozostawał Du Pont – ten gigant chemiczny miał w tym czasie bardzo duży wpływ na stanowisko rządu amerykańskiego, bez którego podpisanie jakiegokolwiek skutecznego porozumienia międzynarodowego nie było możliwe.

Istotna zmiana następuje w 1985 roku, kiedy zespół naukowy pod kierunkiem Farmana publikuje w „Nature” artykuł, który wstrząsa międzynarodowym środowiskiem naukowym. Opublikowane wyniki wskazują na bardzo rozległą dziurę ozonową nad Antarktydą. Stopień ubytku ozonu oraz rozległość dziury jest dużym zaskoczeniem nawet dla specjalistów zajmujących się tym problemem. Oprogramowanie wykorzystywane przez NASA początkowo klasyfikuje te obserwacje jako błąd, ponieważ nikt nie spodziewał się, że tak niskie koncentracje ozonu w stratosferze są w ogóle możliwe.

Pod wpływem tych informacji w tym samym roku państwa zrzeszone w ONZ podpisują Konwencję Wiedeńską o ochronie warstwy ozonowej. Konwencja ta jest bardziej deklaracją o woli ochrony warstwy ozonowej niż aktem prawnym, który pozwalałby na rzeczywiste działania.

W 1986 roku ma miejsce kolejny nieoczekiwany zwrot. Du Pont, który do tej pory jednoznacznie sprzeciwiał się jakimkolwiek regulacjom ograniczającym produkcję freonu, we wrześniu tego roku zajmuje stanowisko, w którym popiera międzynarodowe dążenia zmierzające do ograniczenia produkcji CFC (Maxwell and Briscoe, 1997). Pozytywne stanowisko Du Pont skłania ostatecznie rząd amerykański do poparcia Protokołu montrealskiego, do podpisania którego dochodzi w 1987 roku.

Istnieje wiele opracowań analizujących strategię Du Pont, który okazał się bardzo istotnym graczem i bez zmiany stanowiska którego nie doszłoby do podpisania Protokołu montrealskiego. Analizy te wskazują, że Du Pont w całej tej rozgrywce był zainteresowany maksymalizacją zysku. W 1979 roku wygasa patent na produkcję CFC, którego właścicielem był koncern. Du Pont w kolejnych latach notuje niższe zyski z tytułu sprzedaży freonów. W obliczu spadających zysków oraz rosnącej liczby dowodów wskazujących na związek pomiędzy emisją CFC a dziurą ozonową, Du Pont prowadzi intensywne prace badawcze ukierunkowane na znalezienie nieszkodliwego dla ozonu substytutu freonów. Związkiem takim okazuje się HCFC (z ang. *hydro-flouro-flouro-carbons*), którego wytwarzanie zostaje przez Du Pont opatentowane w 1986 roku, co zbiega się ze zmianą stanowiska koncernu.

W wyniku ograniczenia produkcji CFC (mniejsza podaż oznacza wzrost cen freonów) i posiadania patentu na produkcję HCFC koncern Du Pont zanotował w kolejnych latach nagły i gigantyczny wzrost zysków. Dość powiedzieć, że rząd amerykański zdecydował się na wyjątkowy w gospodarce rynkowej krok, mianowicie zastosował względem Du Pont „domiar”, czyli wyjątkowe zwiększenie wysokości podatku względem jednego płatnika (Żylicz, 2016).



Artykuł J. C. Farman „Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction”, 1985 »

PODSUMOWANIE

Protokół montrealski pokazał, że jest możliwa skuteczna walka z globalnymi wyzwaniami ekologicznymi.

Sygnatariuszami porozumienia zostały wszystkie kraje ONZ. Jednak z drugiej strony pokazał również, że kluczowe dla skutecznych działań jest poparcie przemysłu. W przypadku dziury ozonowej było to zaledwie kilku graczy z branży chemicznej, z decydującym wpływem Du Pont, który w ratyfikacji Protokołu montrealskiego widział szansę na poprawę swoich zysków. W emisję gazów cieplarnianych jest natomiast zaangażowana bez porównania większa liczba podmiotów. Ponadto ostatecznie koszty realizacji Protokołu montrealskiego okazały się w skali świata bardzo niskie (na poziomie kilkudziesięciu milionów dolarów rocznie), natomiast skala kosztów w przypadku ograniczania emisji gazów cieplarnianych jest nieporównywalnie większa.

Należy również podkreślić, że skuteczne egzekwowanie protokołu było możliwe, ponieważ jego postanowienia pozwalały na wprowadzenie sankcji handlowych, a mianowicie sygnatariusz protokołu nie mógł handlować freonami z niesygnatariuszem. Mechanizm ten spowodował, że wszystkie kraje miały interes, aby podpisać protokół (bowiem tylko w ten sposób mogły sprzedawać/kupować freon w handlu z USA, bo USA podpisały PM). Niestety obecnie obowiązujące reguły handlu międzynarodowego przyjęte przez Światową Organizację Handlu (WTO) zakazują porozumieniom ekologicznym sankcji handlowych (Żylicz, 2016).

W praktyce okazuje się, że jedynym mechanizmem wypracowanym w ramach Protokołu montrealskiego, który okazał się sukcesem i występuje w porozumieniach dotyczących ograniczania emisji CO₂, jest handel pozwoleniami na emisję, pozwalający na rozluźnienie sztywnych wymagań, które obowiązywałyby, gdyby limity na emisję były niezbywalne.

W tej lekcji nie poruszyliśmy tematu narzędzi ekonomicznych, którymi można wpływać na gospodarkę i poziom emisji gazów cieplarnianych. O tym, jak można sensownie opodatkować emisje CO₂, można przeczytać tu:



naukaoklimacie.pl

Opodatkowanie emisji CO₂, po co kolejny podatek »



**MATERIAŁY
UZUPEŁNIAJĄCE**



KLIMATYCZNE ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ
SZYMON MALINOWSKI

Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę nieożywioną?

Naszą opowieść o konsekwencjach zmiany klimatu zaczniemy od ogólnego wyjaśnienia, jak mogą się one przejawiać. Bardzo ważne jest, by zrozumieć, że zmiana klimatu nie powoduje konkretnych zjawisk meteorologicznych, ale przyczynia się do zmian w opisujących je statystykach – prawdopodobieństwie występowania i nasileniu zjawisk.

Omawiając przykładowe zmiany zachodzące w różnych elementach systemu klimatycznego Ziemi, będziemy mówić zarówno o dotychczasowych wynikach pomiarów, jak i o projekcjach przyszłości. Zanim do tego przejdziemy, wyjaśnimy więc, jak odczytywać projekcje – czym są reprezentatywne ścieżki koncentracji gazów cieplarnianych.

Dzięki tym informacjom łatwiej Ci będzie zrozumieć skrócony opis najważniejszych zmian, jakie w wyniku globalnego ocieplenia zachodzą w pogodzie, ale także oceanie i kriosferze.

LEKCJA **8**

Zmiana klimatu to zmiana statystyk

Wzrost ilości energii zgromadzonej w ziemskim systemie klimatycznym powoduje zmiany w częstości występowania (prawdopodobieństwie) i nasileniu zjawisk meteorologicznych.

Klimat Ziemi lub konkretnego regionu opisujemy, podając zestawy statystyk dotyczących występowania i charakterystyk poszczególnych zjawisk meteorologicznych. W wersji skrótowej mogą to być na przykład obliczone na podstawie danych z wielu lat wartości średnie – średnia temperatura, średnia temperatura dla konkretnego miesiąca w roku, średnia liczba dni z mrozem w ciągu roku itd. W wersji pełniejszej będzie to **cały rozkład prawdopodobieństwa** czy **rozkład częstości występowania**, czyli informacja o tym, jakie jest prawdopodobieństwo (lub częstość występowania) określonych wartości wybranego wskaźnika (np. średniej temperatury dobowej, dobowej sumy opadów czy prędkości wiatru).

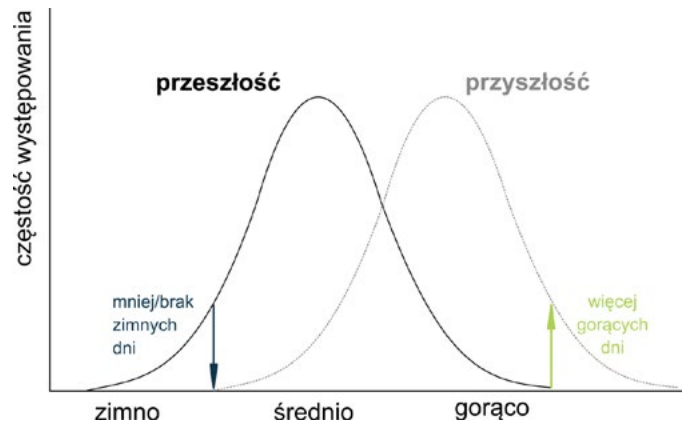


ROZKŁADY GAUSSOWSKIE

W przypadku wielu wskaźników – na przykład temperatury – typowy rozkład częstości ma kształt zbliżony do **krzywej Gaussa** (inaczej – dzwonowej). Maksimum takiej krzywej przypada dla wartości średniej wskaźnika, a o kształcie rozkładu (czy jest wąski i wysoki, czy raczej spłaszczony) mówi jego **wariancja**. Przyjrzyjmy się, co oznaczają zmiany parametrów rozkładu, zakładając, że chodzi o temperaturę (np. zimne, średnie i gorące dni, miesiące czy lata).

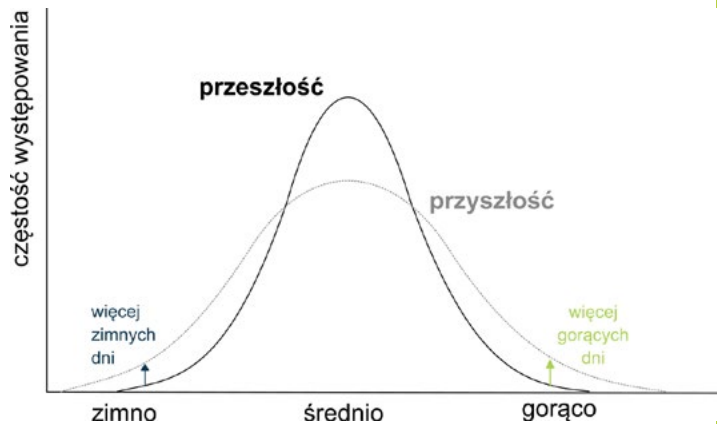
Wzrost średniej oznacza, że cały wykres przesuwają się w stronę większych wartości, a więc:

- najczęściej występują wartości wyższe niż dotąd,
- przybywa dni gorących, pojawiają się dni gorętsze, niż dotąd występowały,
- dni zimne robią się rzadsze.



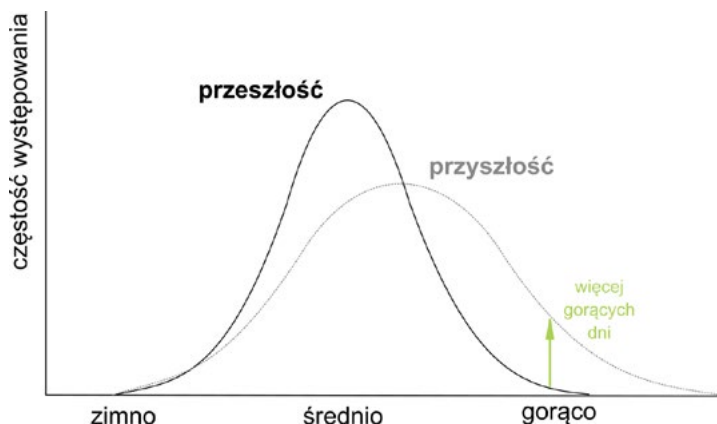
Wzrost wariancji oznacza, że wykres robi się bardziej rozplaszczony. W efekcie:

- ubywa dni o temperaturach bliskich średniej,
- przybywa dni o temperaturach skrajnych,
- rośnie prawdopodobieństwo rekordów zarówno chłodu, jak i ciepła, sytuacje, które kiedyś były nieprawdopodobne, stają się możliwe.



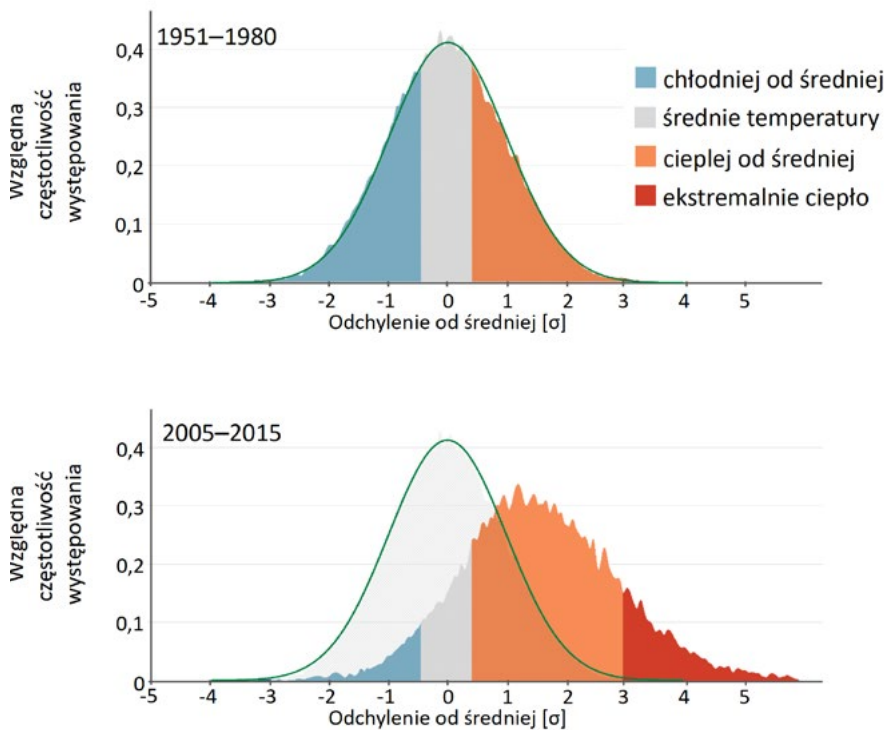
Jednoczesny wzrost średniej i wariancji oznacza, że wykres jednocześnie przesuwa się w stronę wyższych temperatur i rozplaszcza. W rezultacie:

- dni o temperaturze w pobliżu dotychczasowej średniej jest mniej,
- przybywa dni gorących, prawdopodobne są rekordowo gorące,
- dni zimnych może być w przybliżeniu tyle samo co wcześniej – efekty wzrostu i spadku ich liczby częściowo się znoszą.



PRZYKŁAD

Spójrzmy na rysunek poniżej, pokazujący częstość występowania lokalnych odchyłeń od średniej z lat 1951–1980 w przypadku temperatury latem nad lądami półkuli północnej. Wybrano dane akurat dla półkuli północnej, ponieważ południową w większym stopniu pokrywa ocean, który pochłania dużą część energii, przez co wzrost temperatury nad lądami jest tu mniej wyraźny.



Jak można zauważyć, wykres dla lat 2005–2015 jest w porównaniu z wykresem dla okresu 1951–1980:

- przesunięty w prawo (wzrosła średnia temperatura),
- spłaszczony (wzrosła wariancja).

Oznacza to, że:

- chłodnych dni jest obecnie mniej niż w latach 1951–1980, ale wciąż występują,
- mniej jest również dni, które w latach 1951–1980 uznalibyśmy za typowe, w pobliżu średniej,
- dni, które dawniej uznalibyśmy za ciepłe, dziś stanowią ok. 2/3 przypadków (są ok. 2 razy częstsze),
- dni, które dawniej uznalibyśmy za ekstremalnie gorące, dziś stanowią blisko 15% przypadków.

Inaczej mówiąc, mamy dziś częstsze i dłuższe fale upałów.

Rysunek 1: Względna częstotliwość występowania lokalnych odchyłeń temperatury nad lądami latem półkuli północnej od średniej z lat 1951–1980.

Kolorowe wykresy przedstawiają dane dla okresów 1951–1980 (górny panel) i 2005–2015 (panel dolny), a zielona linia odpowiada dopasowanej do danych z pierwszego okresu krzywej Gaussa. Odchylenia od średniej wyskalowano w jednostkach odchylenia standardowego (średniej odpowiada więc zerowe odchylenie).

Kolorem niebieskim oznaczono zakres obejmujący w latach 1951–1980 1/3 najchłodniejszych przypadków, pomarańczowym – 1/3 najcieplejszych przypadków. Czerwienią wyróżniono zakres ekstremalnie wysokich temperatur, które w latach 1951–1980 występowały tylko w 0,1% przypadków.

Źródło: Popkiewicz i in. (2019) na podstawie danych Hansen i in. (2016) i wizualizacji New York Times (2017).

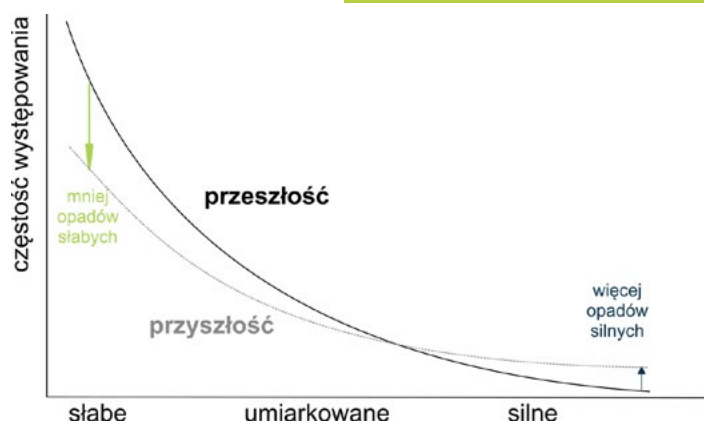
Odchylenie standardowe – pierwiastek z wariancji (tradycyjnie oznaczany jako σ). W rozkładzie opisanym krzywą Gaussa na przedział (średnia $\pm \sigma$) należy 68% przypadków.

ROZKŁADY SKOŚNE

Istnieją również wskaźniki, opisywane rozkładami skośnymi, zgodnie z którymi wartości niskie są bardzo, a wysokie – mało prawdopodobne (lub na odwrót). Przykładem są wskaźniki opadowe, takie jak natężenie czy dobową sumą opadów (ich typowy rozkład przedstawia rysunek poniżej).

W takim przypadku zmiana klimatu prowadzić może do **zmiany skośności**. Trzymając się przykładu opadów, oznacza to, że:

- częstość występowania opadów słabych i umiarkowanych spada,
- częstość występowania opadów silnych – rośnie.



W ten sposób, nawet jeśli roczna suma opadów w wybranym miejscu nie zmienia się znacząco, wydłużają się okresy bezopadowe (rośnie więc prawdopodobieństwo suszy), a jednocześnie wzrasta zagrożenie powodzią i zalaniem wynikającymi z występowania ulew.

ZAPAMIĘTAJ!

Chociaż często w skrótowych komunikatach przeczytasz jedynie o tym, jak zmienia się średnia wartość parametru opisującego system klimatyczny Ziemi (np. temperatura, suma opadów, poziom morza, długość sezonu pożarowego itd.), w rzeczywistości zmianie podlegać może także kształt opisującego go rozkładu prawdopodobieństwa, a więc częstość występowania zjawisk o różnym nasileniu.

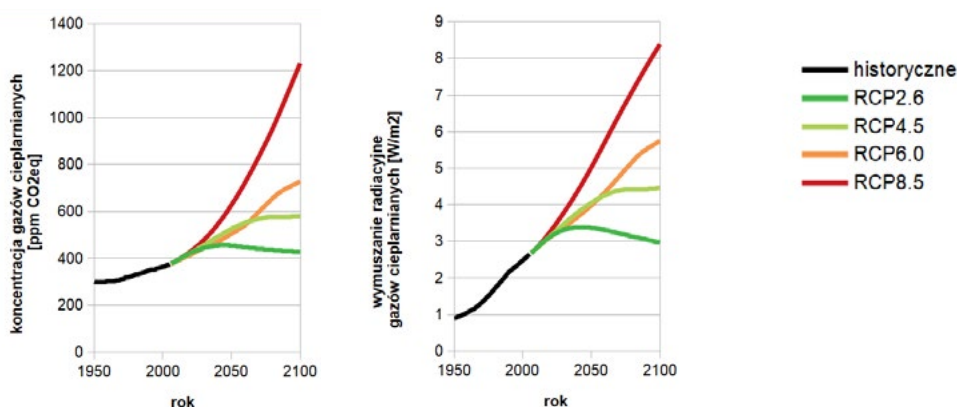
Co więcej, w zależności od położenia geograficznego lub pory roku zmiany wybranego parametru mogą zachodzić w różnym tempie, a nawet w różną stronę. Przykłady znajdziesz w kolejnych rozdziałach tej lekcji.

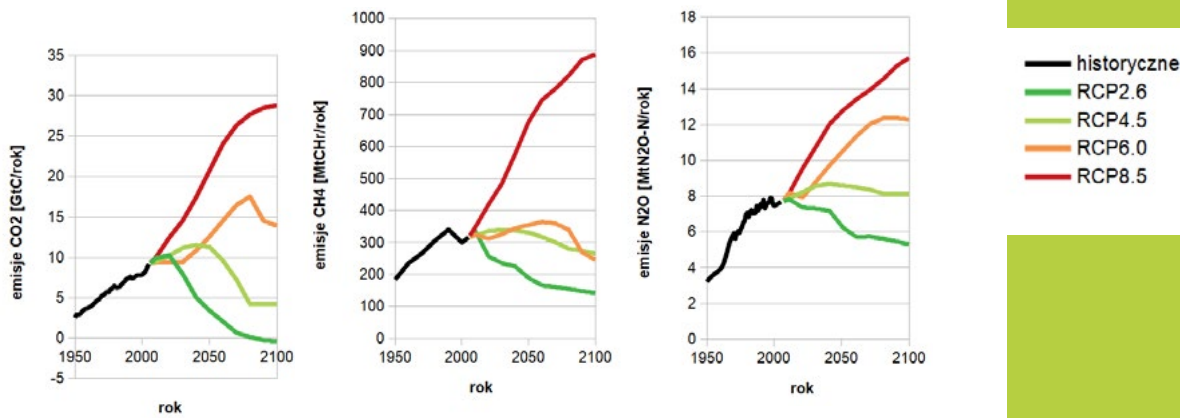
Scenariusze na przyszłość

Naukowcy przedstawiają różne warianty przyszłości klimatu przy założeniu różnych scenariuszy przyszłych emisji gazów cieplarnianych.

Czytając o skutkach zmiany klimatu w przyszłości, spotkasz się z pojęciem „scenariuszy emisji” lub „ścieżek koncentracji”. Wynika to z faktu, że chociaż naukowcy potrafią już całkiem dobrze opisać za pomocą równań zachodzące w ziemskim systemie klimatycznym zjawiska fizyczne, chemiczne i nawet biologiczne, nie mogą w podobny sposób przedstawić zmian, jakie nastąpią (lub nie nastąpią) w światowej gospodarce. Te ostatnie zależą nie tylko od praw przyrody, ale też od decyzji podejmowanych przez wielu ludzi na całym świecie. Nie wiemy więc, czy ludzkość będzie dalej stosować te same rozwiązania społeczne i techniczne co dotąd i emitować stale coraz więcej gazów cieplarnianych aż do wyczerpania zasobów paliw kopalnych, czy też zacznie ograniczać te emisje (i w jakim tempie będzie to robić). Aby przygotować projekcję klimatu, trzeba więc przyjąć jakieś założenia na ten temat – wybrać konkretny scenariusz przyszłych emisji.

W szerszych opracowaniach znajdziemy zazwyczaj wyniki nie dla jednego lecz dla dwóch lub większej liczby scenariuszy. Współcześnie standardowo (ale nie obowiązkowo) stosuje się zestaw **reprezentatywnych ścieżek koncentracji** (ang. *representative concentration pathways*, w skrócie **RCP**) dobranych przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu (Stocker i in., 2013). To cztery grupy scenariuszy, w których koncentracje gazów cieplarnianych w przyszłości zmieniają się w różnym tempie, tak że w roku 2100 wymuszanie radiacyjne związane z działalnością człowieka wynosi około 2,6, 4,5, 6,0 lub 8,5 W/m² (stąd biorą się oznaczenia ścieżek, odpowiednio RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 i RCP8.5).





Rysunek 2: Zestawienie danych historycznych i reprezentatywnych ścieżek emisji (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 i RCP8.5): koncentracje gazów cieplarnianych (łącznie, w przeliczeniu na ekwiwalent CO_2), odpowiadające im wymuszenia radiacyjne (w W/m^2) oraz emisje trzech podstawowych gazów cieplarnianych – dwutlenku węgla, metanu i tlenku azotu(I). Dane obserwacyjne kończą się tu na roku 2005, jednak, jak widać, początkowo zmiany koncentracji gazów cieplarnianych są zbliżone, niezależnie od scenariusza.

Dane za: Meinshausen i in., (2011).

W każdym przypadku opisuje się zmiany koncentracji wszystkich istotnych gazów cieplarnianych, a także różnego rodzaju zanieczyszczeń powietrza wpływających na albedo planetarne.

- RCP8.5 to scenariusz określany czasem jako „biznes jak zwykle” (ang. *business as usual*) - pesymistyczna wizja przyszłości, w której emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną, podobnie jak dotąd, aż do wyczerpania się paliw kopalnych,
- RCP6.0 i RCP4.5 to scenariusze, w których emisje gazów cieplarnianych dalej rosną przez kilka dekad (ale wolniej niż dotychczas) i dopiero potem zaczynają się obniżać (CO_2 i CH_4) lub przynajmniej stabilizować (N_2O),
- RCP2.6 to bardzo optymistyczny scenariusz, zgodnie z którym emisje gazów cieplarnianych obecnie już powinny spadać a w drugiej połowie XXI wieku ludzkość usuwałaby z atmosfery więcej CO_2 , niż wprowadzała.

UWAGA!

Ani ustabilizowanie, ani nawet spadek emisji długożyjących gazów cieplarnianych (takich jak dwutlenek węgla) nie wystarczy do zatrzymania wzrostu ich koncentracji w powietrzu.

Jak możesz pamiętać z poprzednich lekcji, naturalne procesy usuwające CO_2 z atmosfery nie równoważą bieżących emisji antropogenicznych. Każda nowo wprowadzona w obieg porcja gazu zwiększa całkowitą, historyczną sumę emisji, z którą muszą się uporać.

Z każdą ścieżką powiązać można różne zmiany gospodarcze i społeczne, które prowadziłyby do takich a nie innych zmian w składzie atmosfery. W rzeczywistości nie spodziewamy się, by któryś z tych scenariuszy miał być zrealizowany „jeden do jednego”. Zakładamy, że w rzeczywistości ścieżka zmian koncentracji gazów cieplarnianych przypadnie gdzieś pomiędzy czterema „ścieżkami reprezentatywnymi” i że podobnie będzie z konsekwencjami tych zmian. Przeczytasz o nich w kolejnych rozdziałach tej lekcji.

Zmiany w pogodzie

Zmiana klimatu przynosi częstsze i dłuższe upały, zwiększone prawdopodobieństwo susz i powodzi oraz wiele zmian w dynamice zjawisk atmosferycznych.

Szczegółowy opis wszystkich zmian, jakie następują w globalnych i lokalnych procesach i zjawiskach atmosferycznych wymagałby przygotowania obszernego atlasu. Niniejszy rozdział ma za zadanie jedynie dać Ci ogólną orientację w kierunkach i skali zmian zachodzących na świecie i w Polsce.

CORAZ CIEPLEJ, CORAZ WIĘCEJ UPAŁÓW

W rezultacie wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze Ziemi i gromadzenia się energii w ziemskim systemie klimatycznym obserwujemy obecnie wzrost temperatury niższych warstw atmosfery (troposfery). Zgodnie ze standardami Światowej Organizacji Meteorologicznej temperaturę powietrza mierzy się na stacjach meteorologicznych na wysokości 2 m nad gruntem. Dla każdej stacji określamy średnią klimatyczną dla określonego okresu referencyjnego i anomalie. Globalną średnią z takich anomalii nazywamy średnią anomalią temperatury powierzchni Ziemi. Jej zmiana świadczy o średniej zmianie temperatury powietrza przy powierzchni planety (często mówimy w uproszczeniu o zmianie średniej temperatury).

Więcej na temat tych pojęć dowiesz się z tekstu:

Co to właściwie jest anomalia? »

ANOMALIA – odchylenie od wartości średniej. W klimatologii najczęściej oznacza odchylenie wartości zaobserwowanej w konkretnym pomiarze lub średniej dla wybranego roku od średniej wieloletniej, obliczonej na podstawie pomiarów z określonego okresu referencyjnego.

DEFINICJA
ANOMALIA

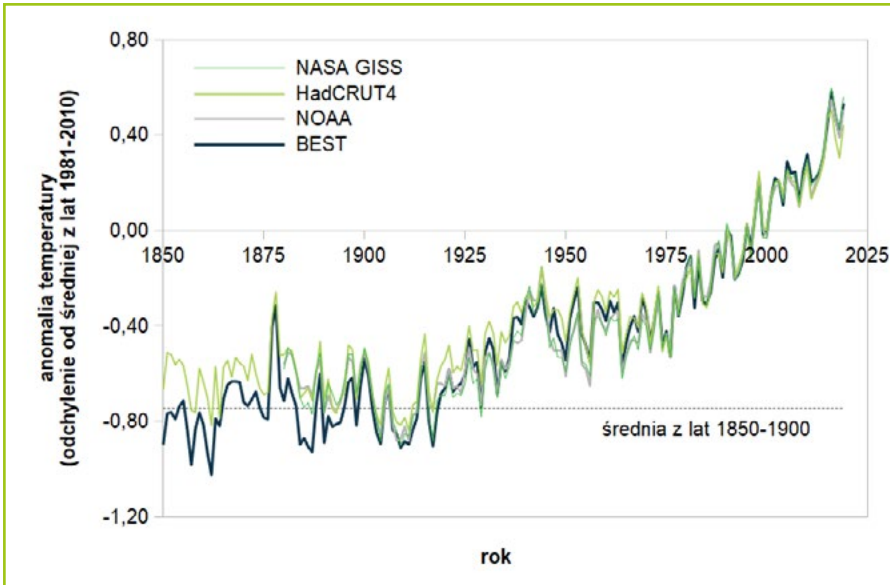
OKRES REFERENCYJNY – przedział czasowy (zwykle trzydziestoletni lub dłuższy), na podstawie którego ustala się średnią wartość wybranego parametru służącą do określania anomalii.

DEFINICJA
OKRES REFERENCYJNY



Zgodnie z propozycją Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu za okres referencyjny odpowiadający w przybliżeniu czasom przedprzemysłowych uznaje się lata 1850–1900 (IPCC, 2018).

Jak możesz zauważyć na wykresie poniżej, z roku na rok średnie anomalie temperatury wahają się, co jest przejawem naturalnej zmienności pogodowej. Gdy jednak weźmiemy pod uwagę zmiany wieloletnie, okaże się, że od czasów przedprzemysłowych do 2017 roku temperatura wzrosła już średnio o $1 \pm 0,2^\circ\text{C}$ (IPCC, 2018). Ostatnie okresy pięcioletni (2015–2019) i dziesięcioletni (2010–2019) były najcieplejszymi takimi okresami w historii pomiarów (WMO, 2020).

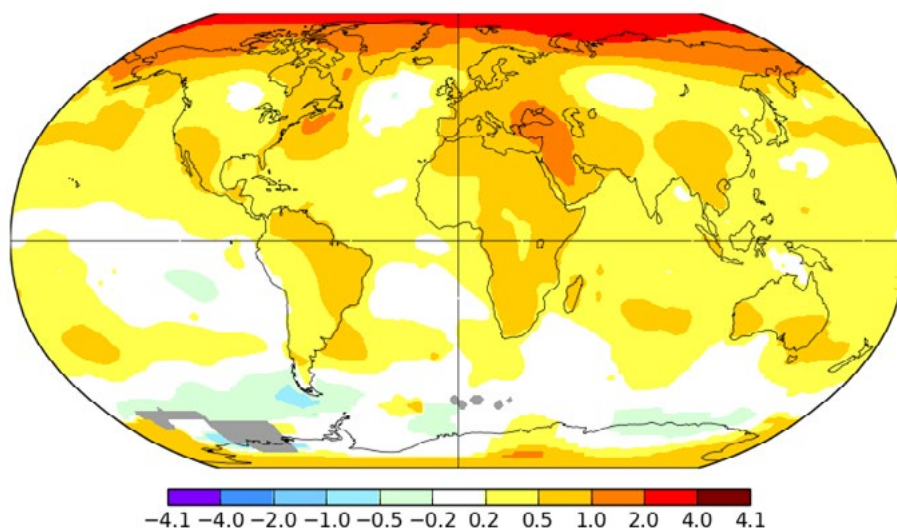


Rysunek 3: Zmiany średniej temperatury powierzchni Ziemi względem okresu referencyjnego 1981–2010, w stopniach Celsjusza. Na wykresie przedstawiono wyniki analiz czterech różnych zespołów badawczych. Linia przerywana pokazuje wartość średnią z lat 1850–1900 (przybliżenie stanu dla czasów przedprzemysłowych).

Źródła: NASA GISS, HadCRUT4, NOAA, BEST.

Zmiany temperatury w różnych częściach świata zachodzą w różnym tempie. Najszybszy wzrost temperatury obserwujemy w pobliżu bieguna północnego (patrz rysunek poniżej) – jest to związane z opisywanym już we wcześniejszych lekcjach sprzężeniem pomiędzy temperaturą wody, zasięgiem lodu morskiego i ilością pochłanianego przez powierzchnię promieniowania słonecznego. Średnio rzecz biorąc, lądy ogrzewają się szybciej niż oceany, a półkula północna (na której powierzchnia lądów jest większa) szybciej niż południowa.

Należy pamiętać, że na temperaturę w konkretnych częściach świata wpływają także inne czynniki, na przykład zmiany w transporcie ciepła przez prądy morskie, z których część zachodzi cyklicznie i powoduje wieloletnie lub sezonowe podwyższenie lub obniżenie średnich temperatur nad danym akwenem. Te zmiany to także jedna z przyczyn, dla których wykres średniej temperatury powierzchni Ziemi nie jest linią gładką.



O zmianach w prądach oceanicznych odbijających się na średniej temperaturze powietrza przeczytasz między innymi w tekstach:

Mit: Zmiany klimatu są powodowane zmianami prądów morskich »

„Pauza w ociepleniu” a wiatry nad Pacyfikiem »

Mit: Za globalne ocieplenie odpowiada El Nino »

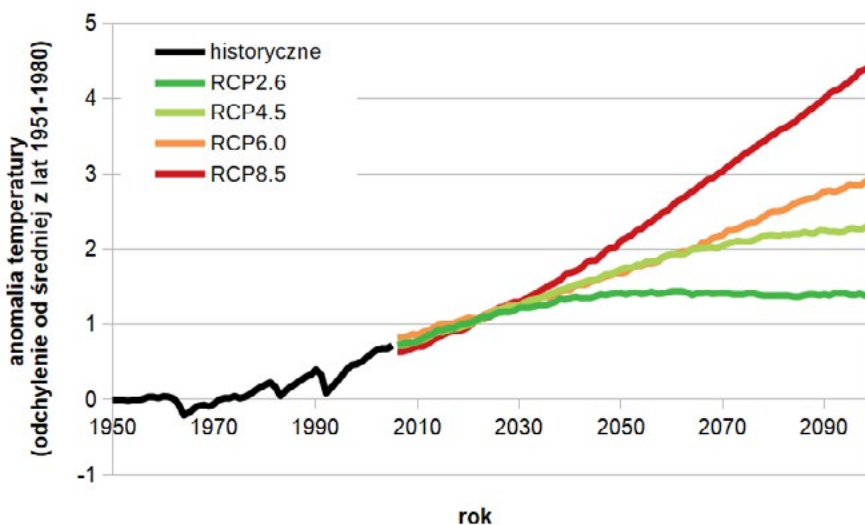
Rysunek 4: Anomalie temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi względem okresu referencyjnego 1981–2010, w stopniach Celsjusza. Dane dla dziesięciolecia 2010–2019,

Źródło: NASA GISS »

W przyszłości spodziewamy się dalszego wzrostu średniej temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi. To, jak długo będzie postępował i jak daleko zajdzie, zależy od tego, jak będzie zmieniać się nasza gospodarka. Jak możesz zobaczyć na wykresie poniżej, stosunkowo szybki spadek emisji i ustabilizowanie koncentracji gazów cieplarnianych (scenariusze RCP2.6 i RCP4.5) dają szansę na ustabilizowanie średniej temperatury jeszcze w XXI wieku, na poziomie ok. 1,5–2,5°C wyższym niż w czasach przedprzemysłowych. Dalszy wzrost emisji doprowadzi jednak do wzrostu średniej temperatury o kilka stopni w tym stuleciu i jeszcze większego w kolejnych. Jak wskazują najnowsze badania, wzrost temperatury o więcej niż 2°C względem średniej z czasów przedprzemysłowych poważnie zwiększa ryzyko przekroczenia wielu punktów krytycznych systemu klimatycznego Ziemi oraz progu planetarnego (patrz lekcja 2).

CHYBA WIESZ, ŻE ?

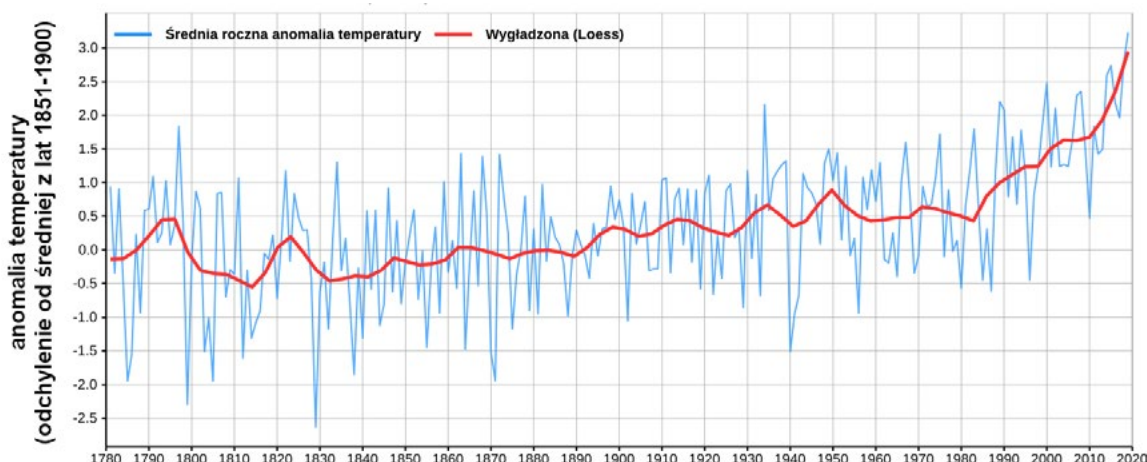
📌 Przepływy energii między atmosferą i oceanem istotnie wpływają na temperaturę powietrza, ale nie zmieniają ilości energii zgromadzonej w ziemskim systemie klimatycznym. Dlatego lepszą miarą stanu systemu byłaby całkowita ilość zgromadzonej w nim energii (jest ona zmagazynowana przede wszystkim w oceanie).



Rysunek 5: Historyczne pomiary oraz projekcje wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi przy założeniu czterech reprezentatywnych ścieżek koncentracji. Kolorowe krzywe przedstawiają średnie z wielu obliczeń z wykorzystaniem wielu modeli.

Dane za: Stocker i in. (2013).

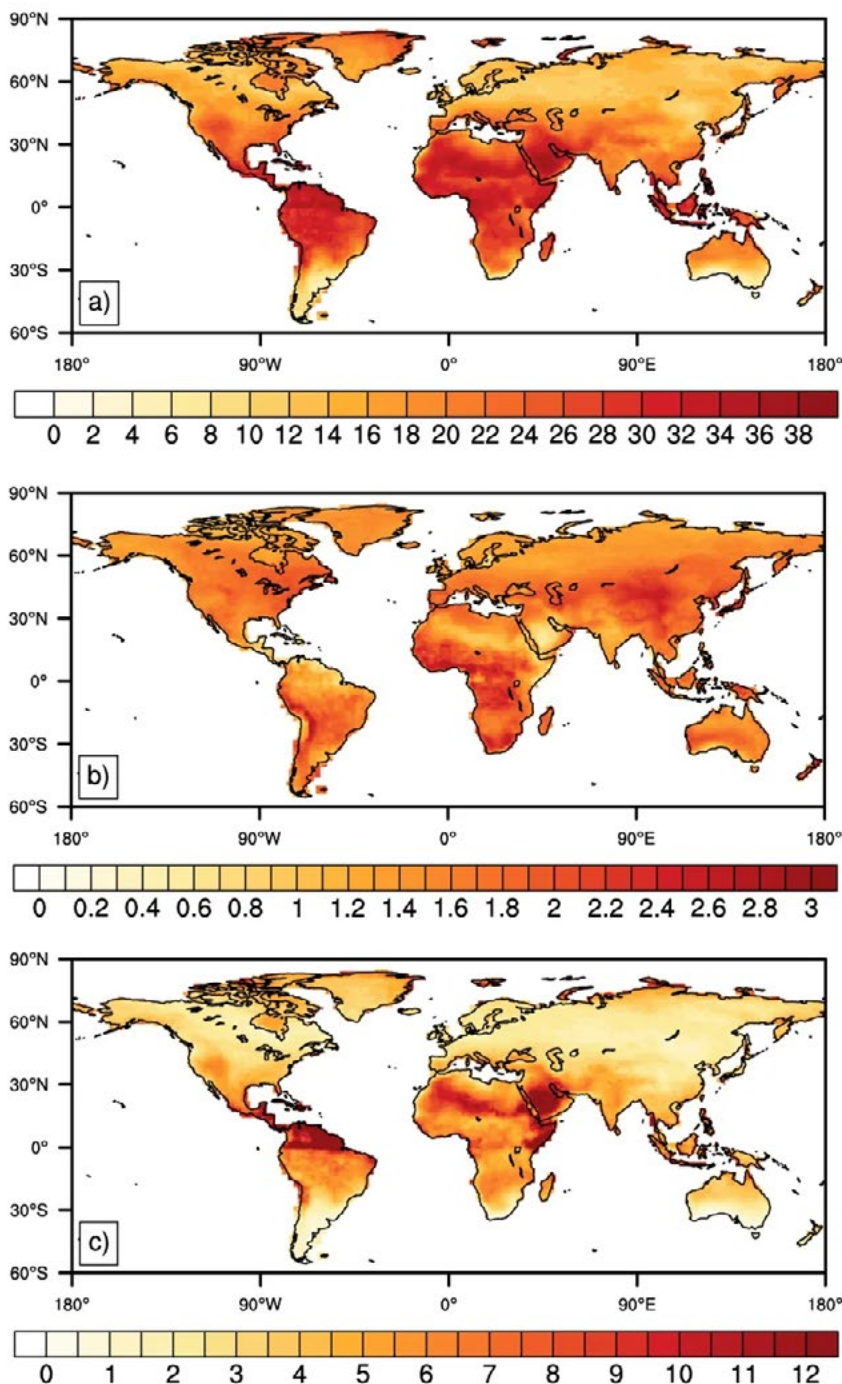
Wzrost średniej temperatury obserwujemy również w Polsce. W latach 1951–2018 średni trend wynosił 0,26°C/10 lat (IMGW, 2019). Jak możesz zauważyć na wykresie poniżej, jest on około dwukrotnie wyższy niż trend globalny. To efekt naszego położenia geograficznego – na półkuli północnej, raczej w pobliżu szybko ocieplającej się Arktyki niż równika. Wzrost średnich temperatur obserwujemy zwłaszcza w miesiącach wiosennych (marzec-maj) i zimowych (grudzień-luty) (IMGW, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d).



Rysunek 6: Zmiany temperatury w Polsce. Linia niebieska – średnia roczna anomalia temperatury (odchylenie od średniej z lat 1851–1900), linia czerwona – dane wygładzone.

Źródło: Djaków (2020).

Jak już wiesz, wzrost średniej temperatury rocznej oznacza w praktyce częstsze i dłuższe okresy temperatur wysokich jak na daną porę roku, w szczególności letnich fal upałów – pokazują to zamieszczone niżej mapy. Zauważ, że i w tym przypadku zmiany nie przebiegają tak samo na całym świecie. Najsilniejsze wzrosty liczby upalnych dni w ciągu roku oraz długości poszczególnych fal upałów widoczne są w Afryce i północnej części Ameryki Południowej. W rejonach zwrotnikowych wahania średniej temperatury latem są mniejsze niż w szerokościach umiarkowanych. Podczas gdy w Europie występują sezony letnie dużo cieplejsze i chłodniejsze od aktualnej średniej (opisuje je rozkład o dużej wariancji), w tropikach warunki w kolejnych latach są zbliżone (opisuje je rozkład o małej wariancji). Wzrost średniej oznacza tu, że prawie każde lato jest cieplejsze niż we wcześniejszych okresach, a więc co roku można spodziewać się wielu upalnych dni.



Rysunek 7: Przeciętna zmiana w liczbie upalnych dni w roku (a), liczbie fal upałów w ciągu roku (b) oraz długości poszczególnych fal (c) przy każdym wzroście średniej temperatury o 1°C.

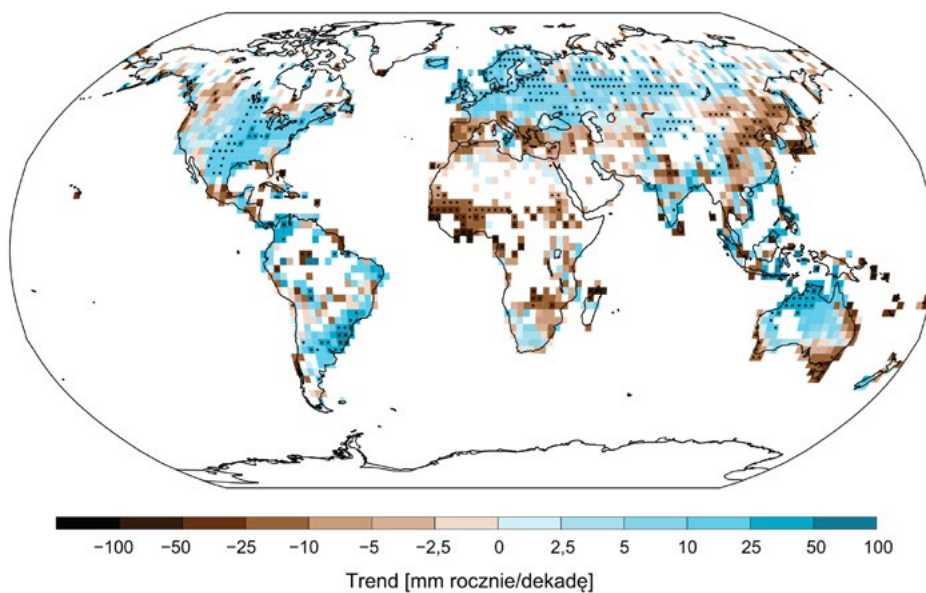
Źródło: Perkins-Kirkpatrick i Gibson (2017).

W Europie od roku 1880 długość fal upałów wydłużyła się dwukrotnie, a gorące dni są dziś trzykrotnie bardziej prawdopodobne niż dawniej (Hov i in., 2013). Obserwujemy to również w Polsce: w latach 1951–1990 dni z temperaturami powyżej 30°C było u nas kilka w ciągu roku, obecnie jest ich kilkanaście, a w przyszłości ta liczba będzie rosła (nawet do ok. 50 w roku 2100, w scenariuszu RCP8.5) (Djaków, 2019).

OPADY

W przypadku opadów nie mamy, globalnie rzecz biorąc, do czynienia z tak wyraźnym trendem jak w przypadku temperatury. Co prawda, ocieplenie klimatu sprzyja silniejszemu parowaniu wody z powierzchni Ziemi, a więc i opadom (ocenia się, że globalnie mogą rosnąć o ok. 7% na stopień ocieplenia, Trenberth, 2011), jednak to, gdzie i ile spadnie deszczu, zależy nie tylko od ilości pary wodnej dostającej się do atmosfery, ale też od:

- ukształtowania terenu (przykładowo w przypadku wilgotnej masy powietrza przechodzącej nad górami można spodziewać się deszczu na stoku nawietrznym, a na zawietrznym oraz za górami – niekoniecznie),
- odległości od oceanu (im dalej w głąb kontynentu, tym mniejszy dostęp wilgoci),
- typowych prędkości i kierunków przepływu mas powietrza oraz wód oceanicznych,
- rodzaju powierzchni (ocean, skały, las itd.).



W wielu regionach świata nie obserwuje się istotnego trendu w rocznych sumach opadów. Tam, gdzie jest on wyraźny, może być zarówno dodatni, jak i ujemny (spójrz na mapę powyżej). Najczęściej mamy do czynienia z zaostreniem, a nie łagodzeniem kontrastów: więcej deszczu pada tam, gdzie i tak było go pod dostatkiem (np. na północy Europy), a mniej tam, gdzie i tak było sucho (np. na południu Australii, w basenie Morza Śródziemnego) (Trenberth, 2011).

Projekcje (patrz mapy na następnej stronie) wskazują, że przyszłe zmiany w rocznych sumach opadów często nie będą znacząco wykroczać poza zakres ich naturalnej zmienności, jednak im więcej gazów cieplarnianych zostanie wy-



O obserwowanych i przewidywanych zmianach w temperaturach występujących w naszym kraju przeczytasz w książce „Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce”. »

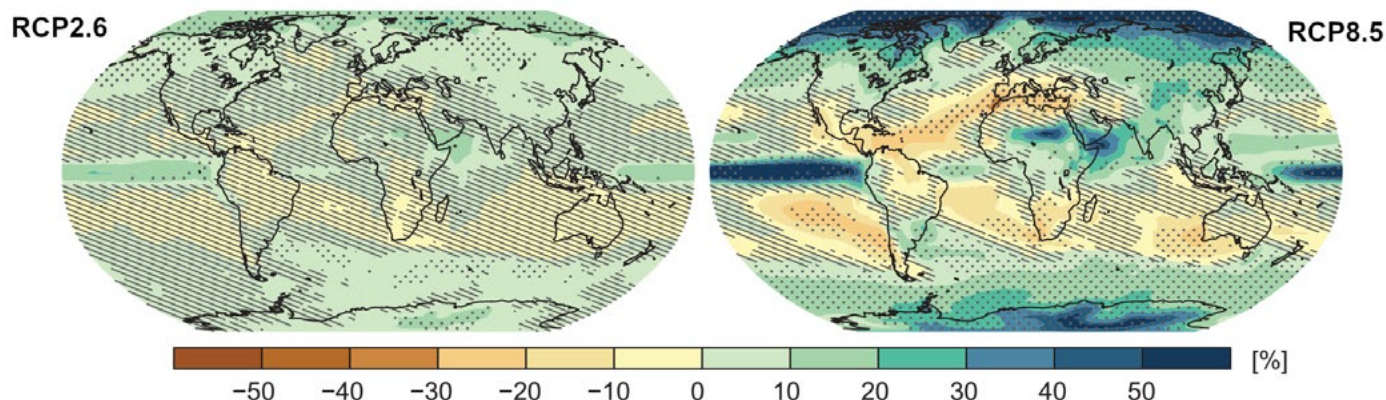
CZY WIESZ, ŻE ?

Standardową miarą opadów jest ich suma – dobową, miesięczną, sezonową, roczną – podawana w milimetrach. Mówi ona o grubości warstwy, jaką utworzyłaby woda pochodząca z opadów (w ciągu doby, miesiąca, sezonu, roku), gdyby nie wsiąkała w grunt i nie spływała w dół zboczy.

Rysunek 8: Średnie dekadowe trendy rocznych sum opadów nad lądami w latach 1951–2010. Kropki oznaczają lokalizacje, w których trendy znacząco odbiegają od zakresu naturalnej zmienności.

Źródło: IPCC (2013).

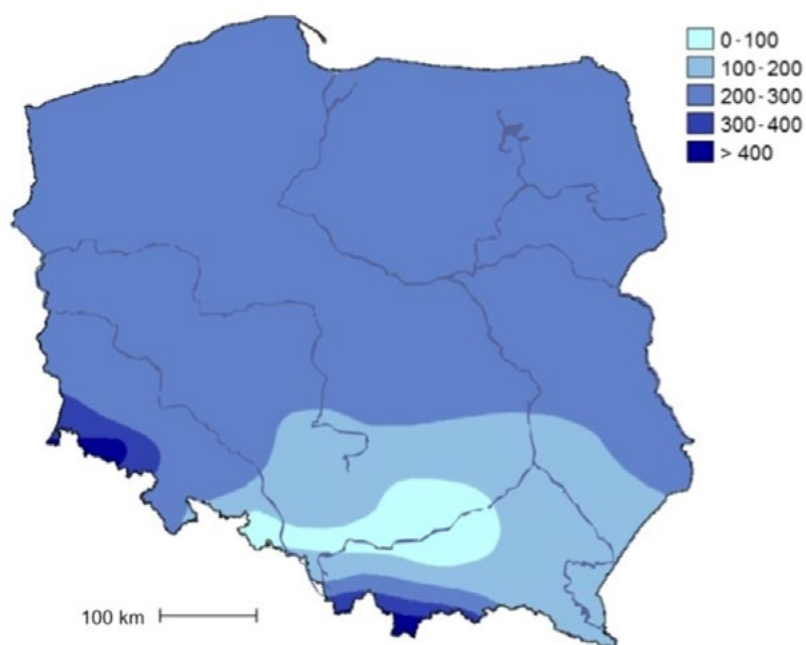
emitowane do atmosfery, tym będą one wyraźniejsze. Spodziewane są dalsze wzrosty sum opadów w rejonach szerokości umiarkowanych i podbiegunowych oraz spadki w okolicach zwrotników (IPCC, 2013).



Rysunek 9: Projekcje zmian średnich rocznych sum opadów w % dla okresu 2081-2100 względem 1986-2005, w scenariuszach RCP2.6 (po lewej) i RCP8.5 (po prawej). Kropki wskazują miejsca, w których zmiany istotnie wykraczają poza zakres naturalnej zmienności opadów w danym rejonie, kreski – miejsca, w których zmiany są małe w porównaniu z naturalną zmiennością.

Źródło: IPCC (2013).

W Polsce obserwujemy lekki wzrost rocznych sum opadów, zwłaszcza w północnej części kraju oraz na Podkarpaciu, w przyszłości można zaś spodziewać się dalszych wzrostów, o 100-200 mm w większości Polski, a na terenach górskich – nawet o ponad 400 mm do okresu 2061-2090. Wzrost dotyczy przede wszystkim miesięcy zimowych (grudnia, stycznia, lutego) (Szwed, 2019). Coraz częściej występują u nas opady intensywne, czyli dni, podczas których dobową sumę opadów przekracza 10 mm (Klimada, 2020), a także związane z nimi powodzie błyskawiczne (Ostrowski i in., 2012). Jednocześnie jednak wydłużają się, i prawdopodobnie będą się wydłużać, okresy bez opadów (Szwed i in., 2007), co w połączeniu z nasilonym przez wzrost temperatury parowaniem sprzyja występowaniu susz. Więcej na temat mechanizmów ich powstawania przeczytasz w kolejnej lekcji.



Rysunek 9: Projekcja zmian w rocznych sumach opadów (w milimetrach): różnica pomiędzy przewidywaniami modeli numerycznych dla scenariusza A1B (zgodnie z którym światowa populacja w drugiej połowie XXI wieku zacznie spadać, a energia będzie pozyskiwana zarówno z paliw kopalnych, jak i źródeł nieemisyjnych – Nakicenovic i Swart, 2000) dla lat 2061-2090 a aktualnymi obserwacjami.

Źródło: Szwed (2019).

ZJAWISKA BURZOWE I PRĘDKOŚCI WIATRU

Do powstawania ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak burze czy cyklony tropikalne, niezbędne są duże ilości energii. Nasilenie się efektu cieplarnianego i gromadzenie w ziemskim systemie klimatycznym (na lądzie, ale przede wszystkim – w oceanie) dodatkowej energii sprzyja więc występowaniu gwałtowniejszych zjawisk atmosferycznych.

W przypadku cyklonów tropikalnych – powstających nad rozgrzаныmi oceanami wirów atmosferycznych o średnicach rzędu tysiąca kilometrów, przemieszczających się niekiedy nad lądy i przynoszących zniszczenia związane z dużymi prędkościami wiatru, silnymi opadami i zalewaniem wybrzeży przez wody oceanu – obserwujemy następujące efekty:

- coraz większe prędkości wiatru w cyklonach i coraz częstsze występowanie huraganów najwyższych kategorii (Knutson i in., 2019a),
- wzrost prawdopodobieństwa silnych opadów podczas cyklonów przynajmniej w niektórych regionach (Knutson i in., 2019a, van Oldenborgh, 2017),
- wolniejsze przemieszczanie się układów, przez co poszczególne lokalizacje przez dłuższy czas pozostają pod wpływem silnych wiatrów i opadów (Kossin, 2018),
- przesuwanie się tras, po których poruszają się cyklony tropikalne w stronę biegunów, co oznacza, że na ich działanie w coraz większym stopniu narażone są regiony, które kiedyś ich nie doświadczały (Knutson i in., 2019a),
- zagrożenie wezbraniami sztormowymi dotyczy terenów położonych coraz dalej w głąb lądu.

Przy dalszym wzroście średniej temperatury powierzchni Ziemi naukowcy spodziewają się kontynuacji tych trendów.

Także w naszych szerokościach geograficznych, w szczególności w Europie i w Polsce, obserwuje się wzrost prawdopodobieństwa zjawisk takich jak intensywne burze oraz wzrost maksymalnych prędkości wiatru obserwowanych podczas takich zjawisk (Hov i in., 2013).

GLOBALNA CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA

Zróznicowane nagrzewanie się różnych obszarów Ziemi prowadzi nie tylko do zmian w geograficznym rozkładzie temperatur, lecz także do zmian w cyrkulacji atmosferycznej. Patrząc na średnie prędkości i kierunki przepływów atmosferycznych, możemy zauważyć, że cyrkulacja atmosferyczna ma pewne typowe elementy. Poniżej omówimy przykłady dwóch z nich oraz to, jaki wpływ wywiera na nie globalne ocieplenie.

O zmianach w występowaniu cyklonów tropikalnych więcej przeczytasz w artykułach:

Huragany – skąd się biorą, jak się ją zniszczenie i jak wpływa na nie zmiana klimatu? »

Coraz silniejsze huragany [i nie jest to drobny efekt] »

CZY WIESZ, ŻE ?

📖 Cyklon tropikalny, huragan i tajfun to nazwy zjawisk powstających tak samo i polegających na tym samym. Cyklon tropikalny to nazwa ogólna, huragan oznacza najsilniejsze cyklony występujące na Atlantyku i wschodniej części Pacyfiku, tajfuny zaś to najsilniejsze cyklony nad Pacyfikiem zachodnim.

CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA – ogół przepływów powietrza

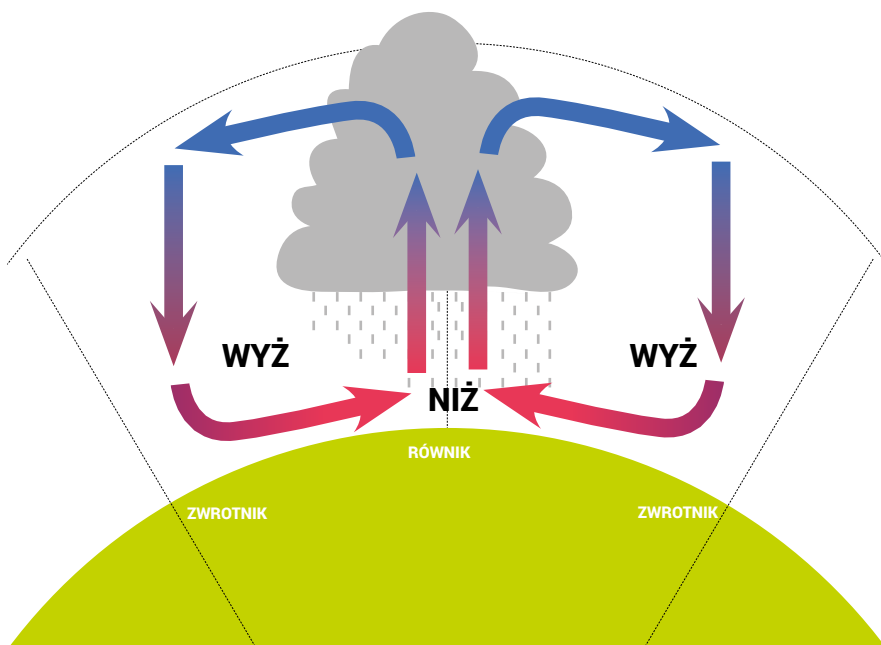
DEFINICJA

KOMÓRKI HADLEYA

Komórki Hadleya obejmują następujące zjawiska:

- 1.** W rejonie równika powietrze silnie nagrzewa się od powierzchni Ziemi i unosi do góry (czemu towarzyszy powstawanie rozbudowanych chmur i silnych opadów).
- 2.** Po dotarciu do tropopauzy powietrze rozptywa się na boki, w stronę zwrotników. Powstający w ten sposób wiatr nazywamy antypasatem.
- 3.** W okolicach zwrotnika powietrze osiada, w rezultacie czego ze zwiększonym prawdopodobieństwem występują tu suche wyży, czyli pozbawione opadów obszary podwyższonego ciśnienia.
- 4.** Powietrze dociera do powierzchni Ziemi i rozptywa się na boki, częściowo powracając w stronę równika. Wiatry wiejące od zwrotników do równika nazywamy pasatami.

W efekcie zmiany klimatu obserwujemy, że zasięg komórek Hadleya poszerza się, co oznacza, że strefa suchych wyżów zaczyna sięgać średnio rzecz biorąc dalej w stronę biegunów, wkraczając np. nad rejony Morza Śródziemnego czy południową Australię.



STREFA NIŻÓW UMIARKOWANYCH SZEROKOŚCI I ZWIĄZANY Z NIĄ PRĄD STRUMIENIOWY

W umiarkowanych szerokościach geograficznych spotykają się masy powietrza chłodnego (płynącego znad biegunów) i ciepłego (napływającego ze strony zwrotnika). W niższych warstwach atmosfery regularnie tworzą się i zanikają **niże atmosferyczne** – obszary obniżonego ciśnienia o średnicach rzędu setek kilometrów, w których powietrze wiruje wokół centrum i które najczęściej przemieszczają się na wschód. Towarzyszą im **wyże** – obszary podwyższone-

Jeśli chcesz dowiedzieć się, jakie konsekwencje mogą mieć te i inne zmiany w cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej, przeczytaj artykuły:

[ABC pożarów w Australii »](#)

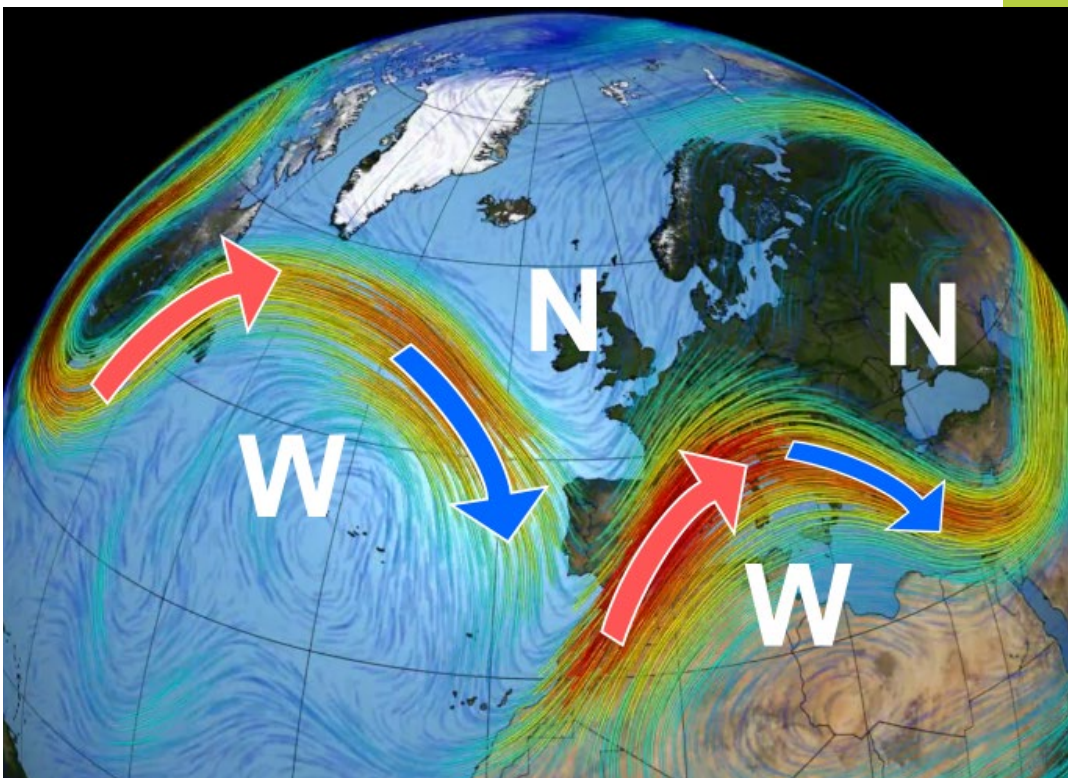
[Kampania pomiarowa EURE-C4A, czyli jak się bada chmury i klimat »](#)

go ciśnienia, w których powietrze również wiruje, ale w kierunku przeciwnym niż w niżach. Dzięki ich współdziałaniu powietrze z okolic podbiegunowych wędruje w stronę niższych szerokości, a zwrotnikowe – na północ.

Jednocześnie w wyższych partiach atmosfery powstaje tak zwany **prąd strumieniowy** – strefa szybkich wiatrów wiejących z zachodu na wschód, odpowiadająca za zmiany pogody z dnia na dzień i tygodnia na tydzień.

Przy dużej różnicy temperatur pomiędzy masami powietrza z południa i północy prędkości wiatru w prądzie strumieniowym są duże, a nad Europą przemieszczają się kolejne niższe atmosferyczne przynoszące wilgotne powietrze znad Atlantyku. Pogoda jest w związku z tym zmienna, z dużą ilością opadów.

Gdy różnica temperatur między zwrotnikiem a Arktyką jest mała, prąd strumieniowy spowalnia i meandruje (tak jak na obrazku poniżej). Wyże i niższe powstające w jego meandrach mają charakter stacjonarny i (zależnie od położenia) powodują w określonych obszarach przedłużone napływy mas powietrza arktycznego lub zwrotnikowego, co skutkuje długimi okresami mało zmiennej pogody z małą ilością opadów (w głąb kontynentu nie dociera wilgoć znad Atlantyku).



Rysunek 10: Prąd strumieniowy. Cienkie, kolorowe kreski pokazują kierunek i prędkość przepływu powietrza w wyższych partiach atmosfery. Kolory żółty, pomarańczowy i czerwony oznaczają kolejno coraz większe prędkości. Prąd strumieniowy występuje tam, gdzie prędkości wiatru są największe. Niebieskie i czerwone strzałki pokazują kierunki napływu ciepłych (czerwone) i chłodnych (niebieskie) mas powietrza. Duże litery „W” oznaczają obszary wyżów a „N” – niżów atmosferycznych. Źródło: NASA Visualization Studio. »

Jak już wiesz, najszybciej ogrzewającym się rejonem Ziemi są okolice bieguna północnego. Oznacza to, że różnica temperatur pomiędzy niskimi i wysokimi szerokościami geograficznymi spada, a prąd strumieniowy coraz częściej spowalnia i zaczyna meandrować. W rezultacie prawdopodobieństwo występowania w naszym regionie dłuższych okresów bez opadów (latem upalnych, zimą często mroźnych) rośnie (Mann i in., 2019).



Więcej na ten temat przeczytasz w artykule:

Fale na froncie »

ZACHMURZENIE

Zmiana klimatu powoduje także zmiany w średnim **zachmurzeniu** – miejscach i wysokościach, na których występują chmury oraz czasach ich życia. Pomiary i obserwacje wskazują, że zmiany te stanowią dodatnie sprzężenie zwrotne dla ocieplania się klimatu (Norris i in., 2016):

- strefy silnego zachmurzenia przesuwają się w stronę biegunów, gdzie w mniejszym stopniu ograniczają ilość promieniowania słonecznego pochłanianego przez Ziemię (ze względu na inny kąt padania promieni słonecznych) – spada albedo planetarne,
- chmury sięgają wyżej i lepiej zapobiegają ucieczce promieniowania ziemskiego w kosmos.

Oba efekty sprzyjają silniejszemu ocieplaniu się Ziemi.



**Więcej na ten temat
przeczytasz w artykule:**

[Przesunięte chmury »](#)

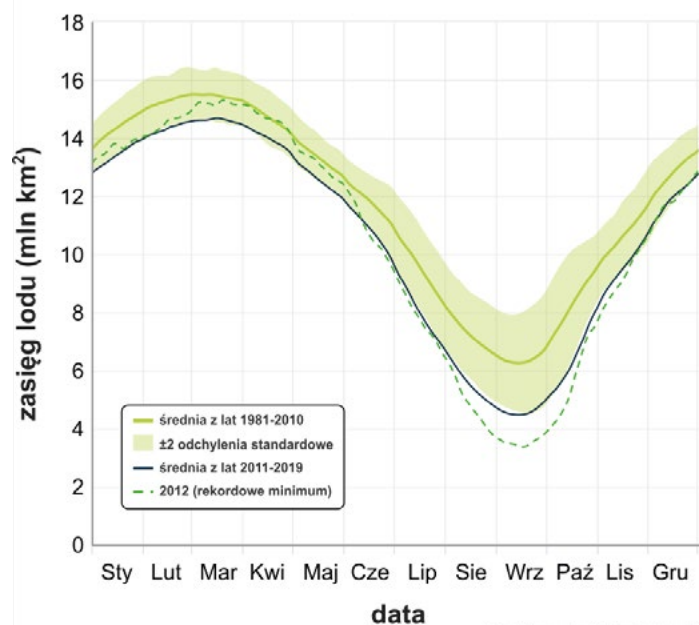


Zmiany w oceanie i kriosferze

Zmiana klimatu powoduje między innymi zanik lodu morskiego, topnienie lodowców i lądolodów oraz wzrost poziomu morza. Zmiany te przebiegają w różnym tempie w różnych częściach świata.

LÓD MORSKI

Lód morski to lód pływający po powierzchni oceanu w rejonie Arktyki oraz wokół Antarktydy (w Antarktyce). Jego zasięg co roku rośnie w półroczu zimowym, a spada w letnim. Lód młody, jednoroczny, ma grubość rzędu 1–1,5 m. Jeśli przetrwa sezon topnienia, może w kolejnych latach zwiększyć ją do 3 m (a lokalnie nawet 8–10 metrów, na drodze pęknięcia i kolizji).



Rysunek 11: Zasięg lodu morskiego w Arktyce na podstawie pomiarów satelitarnych, dane dla kolejnych dni roku. Wykreślono średnią z lat 1981–2010 wraz z zakresem zmienności reprezentowanym przez przedział ± 2 odchylenia standardowe, średnią z lat 2011–2019 oraz przebieg dla roku 2012, w którym odnotowano rekordowo małe (do roku 2019 włącznie) roczne minimum zasięgu lodu.

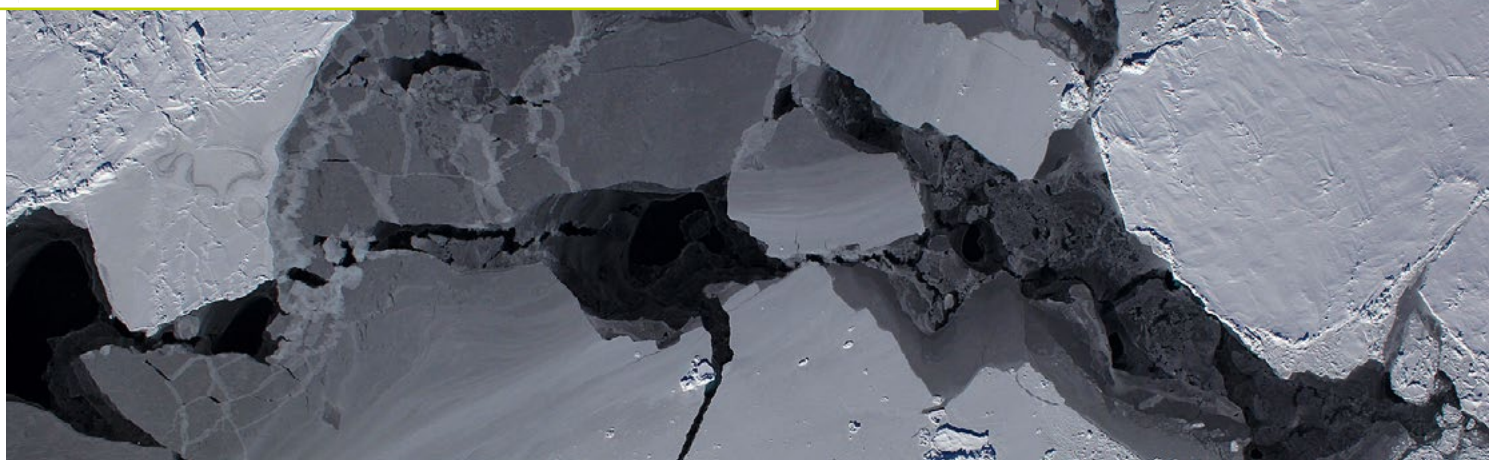
Źródło: National Snow and Ice Data Center.

CZY WIESZ, ŻE ?

Lód morski jest zazwyczaj poprzecinany szczelinami, co utrudnia określenie jego dokładnej powierzchni. Dlatego zamiast niej często używa się wielkości nazywanej **zasięgiem lodu morskiego** (ang. *extent*), a oznaczającej powierzchnię obszaru, który jest przynajmniej w 15% pokryty lodem (NSIDC, 2020). To łatwiejsze do ustalenia, podobnie jak łatwiej jest ustalić obszar, jaki zajmuje plasterk sera z dziurami niż dokładną powierzchnię samego sera (z pominięciem dziur).

Rysunek 12: Połamane fragmenty lodu morskiego w różnym wieku (im lód cieńszy i bardziej przejrzysty, tym młodszy).

Zdjęcie: Michael Studinger, NASA/GSFC (licencja CC BY 2.0).



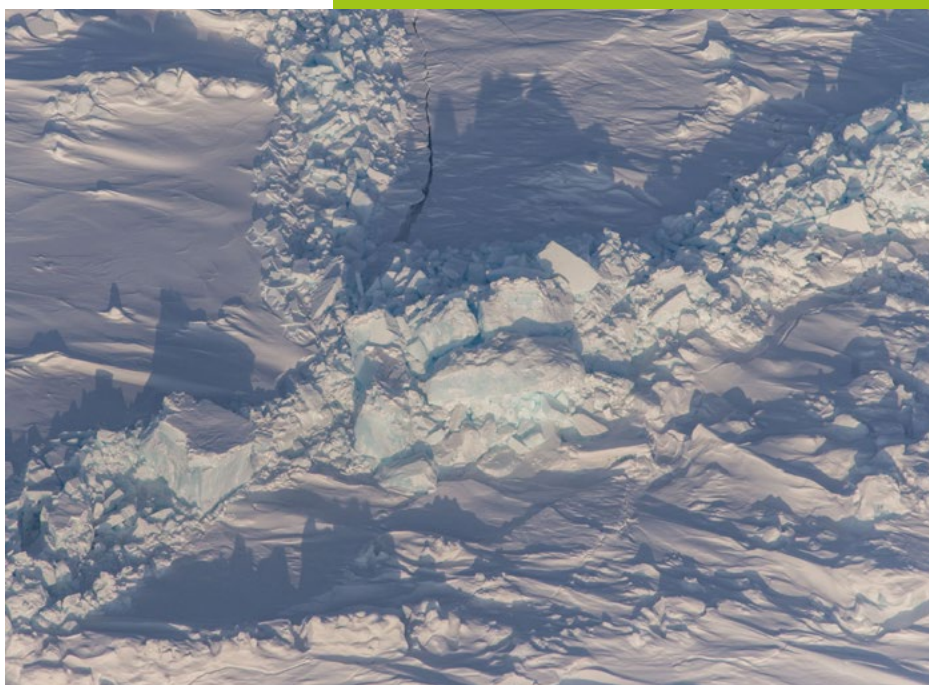


Rysunek 13: Lód morski z widocznymi pęknięciami i strefą, w której w wyniku napierania na siebie tafli lodu powstaje grzbiet.

Zdjęcie: Jeremy Harbeck, NASA.

CZY WIESZ, ŻE ?

- ✎ Połacie lodu mogą pękać pod wpływem falowania, a następnie wpadać na siebie. Gdy dwie olbrzymie kry nacierają na siebie, część lodu w strefie zgniotu jest wypychana do dołu i do góry. Skutkuje to powstawaniem poważnych deformacji – grzbietów na powierzchni i wyrostków na spodzie. Dlatego lód morski niekoniecznie ma gładką powierzchnię, a im jest starszy, tym większą miewa grubość.

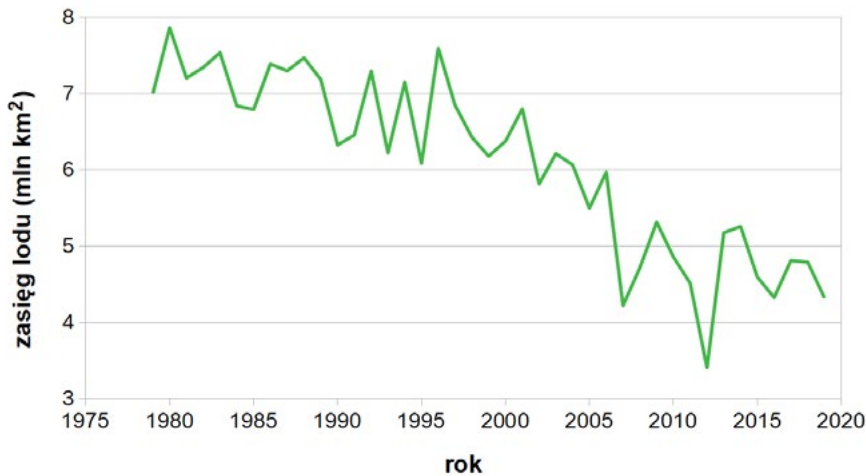


Rysunek 14: Grzbiety na powierzchni lodu morskiego.

Zdjęcie: Jeremy Harbeck, NASA.

Ze względu na naturalny „cykl życia” lodu morskiego, jeśli chcemy sprawdzać, jak jego ilość zmienia się w dłuższym okresie, musimy wybrać i trzymać się konkretnej konwencji. Najczęściej porównuje się ze sobą dane o występującym pod koniec dnia polarnego minimalnym zasięgu lodu w ciągu roku (w przypadku półkuli północnej jest on na ogół odnotowywany we wrześniu). Można jednak śledzić także objętość lodu, jego średni wiek (przekładający się na grubość), średni zasięg w ciągu roku albo zasięg dla konkretnego dnia lub miesiąca.

Od końca lat 70. zasięg lodu jest śledzony bardzo dokładnie dzięki użyciu satelitów. Z wykorzystaniem różnorodnych danych z obserwacji naziemnych i lotniczych odtworzono też, co działo się z lodem arktycznym od połowy XIX wieku (Walsh i in., 2017). Jak wskazują dane, jego zasięg w półroczach letnich zaczął wyraźnie spadać pod koniec XX wieku. W latach 1979–2018 minimalny zasięg lodu w okolicach bieguna północnego spadał średnio rzecz biorąc w tempie $12,8 \pm 2,3\%$ na dekadę (Pörtner i in., 2019).



Rysunek 15: Zmiany zasięgu lodu morskiego w Arktyce na podstawie pomiarów satelitarnych.

Dane za: NSDIC i NASA »

Jednocześnie zaobserwowano także spadek jego średniego wieku (a więc i grubości oraz objętości). Od 1979 roku powierzchnia lodu mającego przynajmniej 5 lat spadła o ok. 90% (Pörtner i in., 2019). Oznacza to, że zasięg lodu w coraz większym stopniu zależy od bieżącej pogody – cienki, młody lód topnieje łatwiej niż gruby lód wieloletni, więc ciepłe lato potrafi znacząco go uszczuplić.

W przyszłości spodziewamy się kontynuacji tych trendów – zarówno spadku zasięgu lodu, jak i nasilania się jego zależności od warunków pogodowych i zmienności z roku na rok. W przypadku ocieplenia klimatu o 1,5°C względem czasów przedprzemysłowych prawdopodobieństwo, że latem konkretnego roku zasięg arktycznego lodu spadnie do zera, będzie wynosiło ok. 1%, a przy ociepleniu o 2°C wzrośnie do 10% (Masson-Delmotte i in., 2018).

Zmiany zasięgu lodu w Antarktyce nie są tak zdecydowane jak w rejonie bieguna północnego. Do roku 2014 obserwowano lekki przyrost tej pokrywy, z kolei w ostatnich latach zaobserwowano rekordowo małe jej zasięgi. W efekcie trend dla lat 1979–2018 nie jest istotny statystycznie (Pörtner i in., 2019). Globalny średni zasięg i objętość lodu morskiego spadają.

Jak możesz pamiętać z lekcji drugiej, kurczenie się pokrywy lodowej w Arktyce pod wpływem coraz wyższej temperatury wody i związane z tym coraz silniejsze ocieplenie w regionie, w którym to występuje, jest przykładem dodatniego sprzężenia zwrotnego. Punkt krytyczny dla zaniku lodu arktycznego prawdopodobnie leży w przedziale 1–3°C ocieplenia względem czasów przedprzemysłowych (Steffen i in., 2018).

LODOWCE I ŁĄDOLODY

Lodowce to duże masy lodu zgromadzonego na lądzie i powstającego w wyniku wieloletniego gromadzenia się i przeobrażania śniegu. Lodowce są na tyle duże i ciężkie, że poddany wysokiemu ciśnieniu lód w ich głębi staje się plastyczny i pod wpływem grawitacji może niezwykle wolno spływać w dół zbocza, tworząc jeziora. Jeśli w jakimś regionie występuje wiele lodowców, w wyniku kolejnych opadów śniegu mogą się one z czasem połączyć i stworzyć wielki system nazywany **lądolodem**. Obecnie na Ziemi mamy dwa lądolody – na Grenlandii (półkula północna) oraz na Antarktydzie (półkula południowa).



Więcej o historii arktycznego lodu przeczytasz w tekście:

Zanik lodu w Arktyce: bezprecedensowe zjawisko czy naturalna zmienność? »



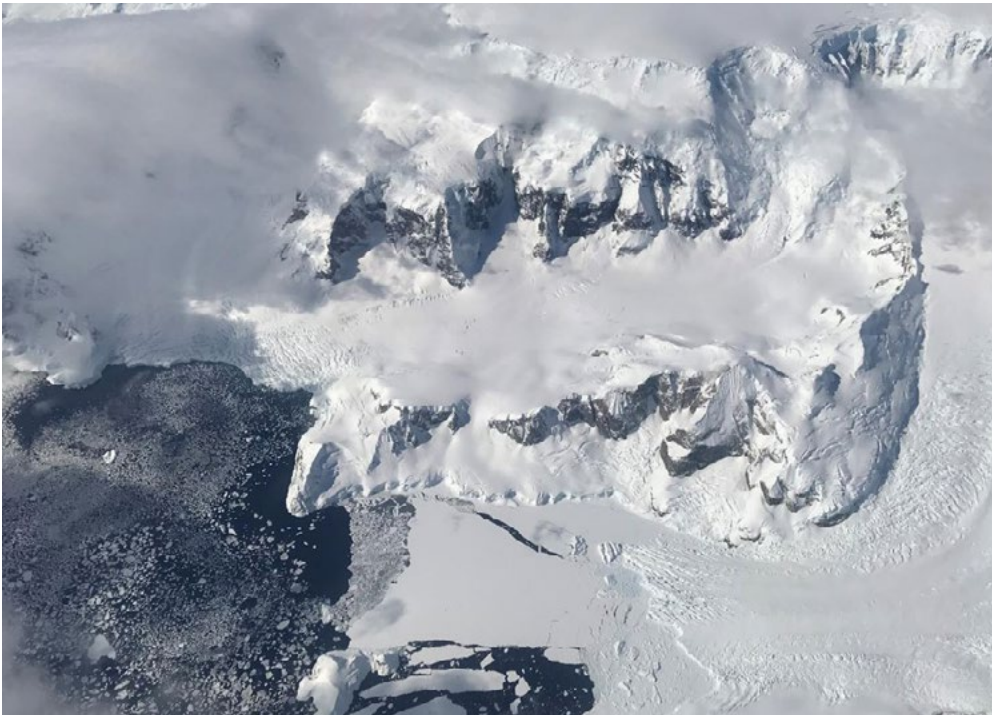
Tu znajdziesz animację pokazującą, jak zmieniał się wiek lodu arktycznego w latach 1984–2019:

Weekly Arctic Sea Ice Age »



Więcej na ten temat przeczytasz także w tekście

Roller coaster zmiany klimatu przyspiesza? »



Rysunek 16: Zdjęcie lotnicze lodowca Nobile w Antarktyce. Po prawej stronie widoczny jest lodowiec spływający z lądu pomiędzy górami. W dolnej części zdjęcia, pośrodku, widoczna jest granica pomiędzy pomarszczonym lodem spływającym z lądu a płatem gładkiego lodu morskiego. W płacie lodu morskiego widoczne są też zgrubienia – to bryły lodu, które oderwały się od lodowca, ale nie zdążyły daleko odpłynąć. Z lewej strony widać obszar, w którym lód morski dopiero powstaje, tworząc na razie niewielkie tafle.

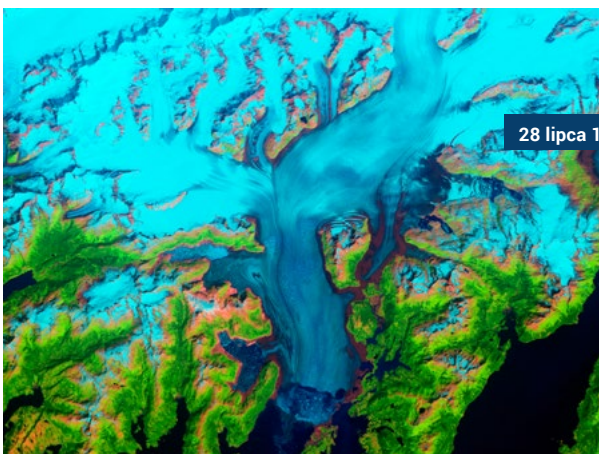
Zdjęcie: Nathan Kurtz, NASA.

CZY WIESZ, ŻE ?

Do przetrwania lodowca niezbędne jest, by jego średni roczny bilans masy pozostawał na dłuższą metę nieujemny. Oznacza to, że na przestrzeni lat masa śniegu spadającego na niego zimą powinna być nie mniejsza niż ilość lodu czy śniegu topniejącego latem oraz odrywającego się od jego krańców (i spadającego w dół zbocza lub odpływającego rzeką lub morzem). Obecnie bilans masy większości lodowców świata jest ujemny (WGMS, 2020).

CZY WIESZ, ŻE ?

Lodowce górskie stanowią w wielu regionach świata gwarancję stabilnego dostępu do wody. Wytopiająca się z nich latem woda zasila rzeki, dzięki czemu ich stan zależy nie tylko od bieżących opadów. W latach suchych odbiorcy „korzystają” z pokładów śniegu i lodu zbierającego się także w poprzednich sezonach. Całkowite stopnienie lodowców w jakimś rejonie oznacza, że przepływy w rzekach w większym stopniu zależą od bieżących opadów.



28 lipca 1986

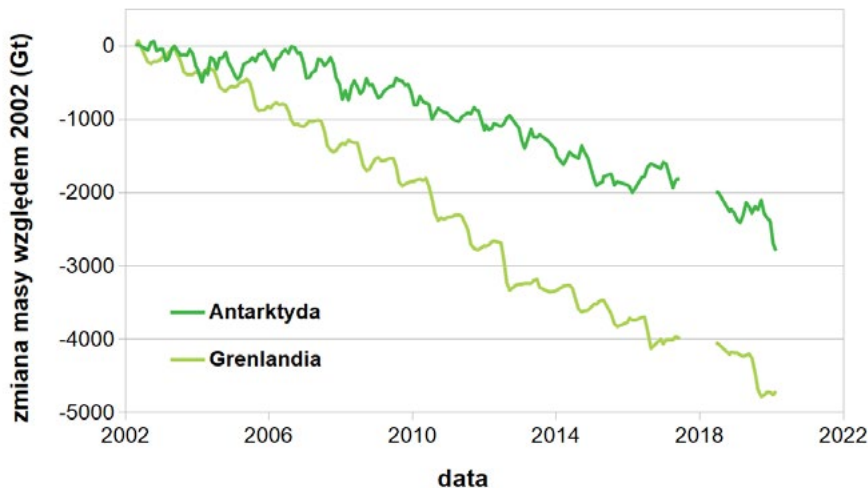
Rysunek 17: Lodowiec Columbia na Alasce – sztucznie pokolorowane obrazy satelitarne, na których lód widoczny jest w kolorze jaskrawoniebieskim. Na górze zdjęcie z 28 lipca 1986, na dole z 2 lipca 2014. W górnej części zdjęć widzimy górne części lodowca, spływające z gór (kolor pomarańczowy oznacza podłoże skalne). Widać, jak łączą się ze sobą różne strumienie lodu. W środku dolnej części pierwszego zdjęcia widzimy szeroki strumień lodu spływający w stronę Zatoki Columbia. Na zdjęciu dolnym widzimy to samo miejsce po latach – zamiast lodu mamy tu teraz wodę (kolor czarny), ta część lodowca praktycznie zniknęła.

Źródło: NASA's Earth Observatory.



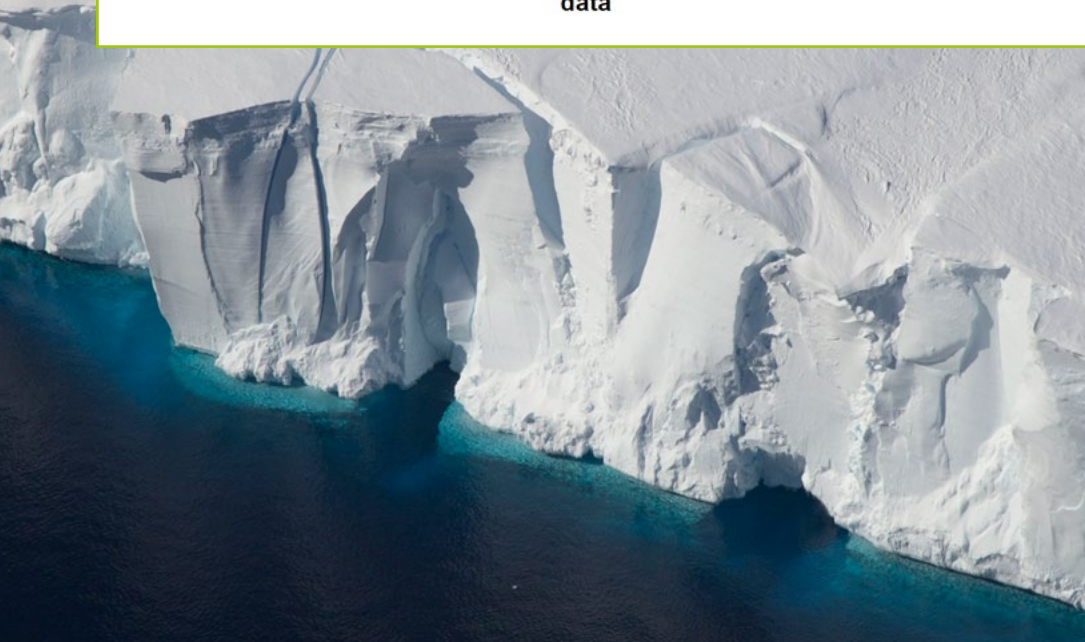
2 lipca 2014

W lądolodzie Grenlandii zgromadzone jest prawie 8 razy mniej lodu niż w lądolodzie Antarktydy, jednak ze względu na swoją lokalizację Grenlandia jest bardziej wrażliwa na wzrost temperatury i obecnie traci rocznie ok. 281 Gt lodu, podczas gdy Antarktyda ok. 146 Gt (NASA, 2020). W przypadku obu lądolodów zaobserwowano wzrost tempa topnienia w porównaniu z końcem XX wieku. W latach 2006–2015 lodowce górskie w innych regionach świata traciły w sumie 220 ± 30 Gt lodu rocznie (Pörtner i in., 2019).



Rysunek 18: Spadek masy Antarktydy i Grenlandii względem stanu w roku 2002. W przypadku Grenlandii widoczny jest wyraźny cykl roczny związany z zimową akumulacją śniegu (wzrosty masy) i letnimi roztopami (latem w związku z podwyższonymi temperaturami występuje tu intensywne topnienie lodu na powierzchni). W przypadku Antarktydy regularność jest mniejsza, mamy tu z jednej strony niższe temperatury latem, a z drugiej – mniej obfite opady. Dane pochodzą z satelitarnych pomiarów zmian w grawitacji, na przełomie lat 2017 i 2018 na orbicie nie było satelitów wykonujących te pomiary.

Źródło: NASA.



Rysunek 19: Lodowiec Getza na obrzeżach Antarktydy Zachodniej. W wyniku kontaktu z dostarczającą ciepło i falującą wodą krańcowe części lodowca stopniowo odrywają się (spójrz na widoczne już szczeliny), a następnie odpływają jako tzw. „góry lodowe”. Proces ten nazywamy „cieleniem”.

Zdjęcie: Jeremy Harbeck, NASA.

Jak pisaliśmy już w lekcji drugiej, dla tempa topnienia i spływu lodu z lądu znaczenie ma ukształtowanie podłoża pod poszczególnymi regionami lądolodów. Może ono sprzyjać przyspieszeniu topnienia w miarę cofania się lodowca (skracania jego zasięgu) – mamy wtedy do czynienia z dodatnim sprzężeniem zwrotnym. W przypadku wielu lodowców wyprowadzających lód z lądolodów można określić punkty krytyczne, których przekroczenie oznaczać będzie, że zaniku konkretnego lodowca nie da się już zatrzymać nawet przy zatrzymaniu ocieplania się klimatu. W przypadku lądolodów Grenlandii i Antarktydy Zachodniej punkty krytyczne leżą prawdopodobnie w zakresie 1–3°C ocieplenia względem czasów przedprzemysłowych, w przypadku Antarktydy Wschodniej – powyżej 5°C ocieplenia (Steffen i in., 2018).

WZROST POZIOMU MORZA

Mówiąc o globalnej zmianie klimatu najczęściej, podajemy informacje o wzroście globalnego średniego poziomu morza, czyli o tym, jak rośnie objętość wody zgromadzonej w oceanie. Wzrost ten jest obecnie najszybszy od co najmniej 2500 lat (Kopp i in., 2016). W latach 1901–1990 poziom morza rósł średnio rzecz biorąc w tempie 1,4 mm/rok, w latach 2006–2015 było to już ok. 3,6 mm/rok (Pörtner i in., 2019).

CZY WIESZ, ŻE ?

Ujemne temperatury powietrza nad lądolodami nie uniemożliwiają im topnienia. Schodzące z lądolodów do oceanu jezory lodu pozostają w kontakcie z coraz cieplejszą wodą, która podmywa je i przyspiesza ich topnienie oraz odrywanie się od nich gór lodowych, a jednocześnie – spływ kolejnych porcji lodu z głębi lądu. W rezultacie straty lodu przestają być równoważone przez opady śniegu w centrum lądolodu.

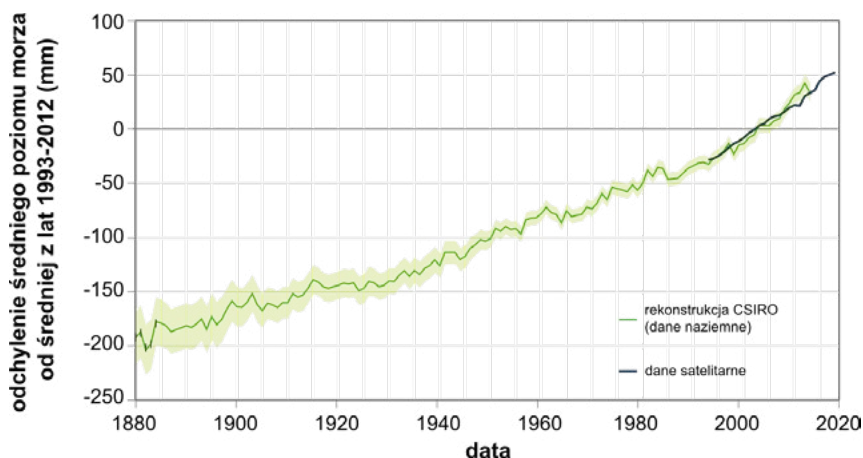


Więcej na ten temat przeczytasz w tekstach:

Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony »

Antarktyda jak butelka – szybko się opróżnia po odkorkowaniu »

Ostatni spokojny fragment Grenlandii już niestabilny »



Rysunek 20: Zmiany poziomu morza: odchylenie od średniej z lat 1993–2012 (nietypowy okres referencyjny dobrano ze względu na dostępność danych z obu serii). Przedstawiono dwie serie danych – rekonstrukcję bazującą na danych z wodowskazów naziemnych wykonaną przez Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) » oraz wyniki nowoczesnych pomiarów satelitarnych przetworzone przez Copernicus Marine Environment Monitoring Service. »

Dane za: European Environment Agency. »

Wzrost średniego poziomu morza to efekt współdziałania dwóch podstawowych zjawisk:

1. topnienia lodowców i lądolodów, w wyniku czego w oceanie przybywa spływającej z lądu wody,
2. rozszerzalności termicznej wody, czyli zwiększania się jej objętości pod wpływem temperatury.

Ich wkłady zmieniają się w czasie. Początkowo dominujące znaczenie miała rozszerzalność termiczna, obecnie – przede wszystkim ze względu na przyspieszenie topnienia Grenlandii – na prowadzenie wysunął się wzrost ilości wody w oceanie. Szacunkowe wkłady we wzrost poziomu morza w latach 2006–2015 pokazuje tabela 1. Jej ostatnia linijka dotyczy wymiany wody pomiędzy lądami a oceanem. Ta wielkość obejmuje z jednej strony czynności człowieka (np. pobieranie wody ze zbiorników podziemnych i uwalnianie jej po użyciu do spływających do morza rzek), a z drugiej zjawiska naturalne, takie jak zebranie się dużej ilości wody na lądzie w wyniku nasilonych opadów (np. w 2011 związane ze zjawiskiem La Niña opady w Australii spowodowały krótkotrwały spadek globalnego poziomu morza – Fasullo, 2013).

Szacunkowe wkłady poszczególnych zjawisk w trend wzrostu poziomu morza w latach 2006–2015.

ZJAWISKO	WKŁAD WE WZROST POZIOMU MORZA (MM/ROK)
Rozszerzalność termiczna wody	$1,40 \pm 0,32$
Topnienie Grenlandii	$0,77 \pm 0,05$
Topnienie Antarktydy	$0,43 \pm 0,09$
Topnienie lodowców w innych regionach	$0,61 \pm 0,08$
Spływ/magazynowanie wody na lądach	$-0,21 \pm 0,15$

Źródło: Pörtner i in. (2019).

CZY WIESZ, ŻE ?

📁 Lokalny poziom morza i jego zmiany zależą nie tylko od objętości wody w oceanie. Znaczenie mają dla niego także zróżnicowanie w ziemskim polu grawitacyjnym (jest silniejsze w pobliżu lądów pokrytych górami lub lądolodem, a słabsze w rejonach rowów oceanicznych), zróżnicowanie w ciśnieniu atmosferycznym, kierunki wiatrów i pływy. Z punktu widzenia mieszkańców wybrzeża istotne są też ruchy pionowe podłoża (np. niektóre części kontynentów wciąż jeszcze podnoszą się po wycofaniu obciążającego je wcześniej lądolodu z czasów epoki lodowej).

➡ **Więcej na temat pomiarów poziomu morza oraz historii jego zmian przeczytasz w tekstach:**

Sekrety poziomu morza »

Tysiące lat zmian poziomu morza »

➡ **Więcej o spadku poziomu morza w 2011 przeczytasz w tekście**

Spadek poziomu oceanów, czyli „gdzie się podzielała ta woda?” »

W latach 1901–2010 średni poziom morza wzrósł o 19 ± 2 cm (IPCC, 2013). Przy założeniu szybkich cięć w emisjach gazów cieplarnianych (scenariusz RCP2.6), do końca XXI wieku możemy spodziewać się wzrostu o 30–60 cm (względem okresu 1986–2005), a w przypadku utrzymania wysokich emisji (RCP8.5) – o 60–110 cm (Pörtner i in., 2019). Należy się przy tym liczyć z faktem, że proces ten będzie trwał w kolejnych stuleciach oraz że w przypadku przekroczenia punktów krytycznych przez cofające się lodowce Antarktydy i Grenlandii może stać się niepowstrzymany nawet przy zahamowaniu ocieplania się klimatu (aż do całkowitego zaniku odpowiednich części lądolodów).

Wzrost poziomu morza stanowi poważne zagrożenie dla ludzi zamieszkujących tereny nisko położone (kilkaset milionów na świecie oraz kilkaset tysięcy w Polsce) oraz infrastruktury, w szczególności terenów portów i delt rzek.

ZMIANY W PRĄDACH OCEANICZNYCH

Jednym ze sposobów rozprowadzania energii po ziemskim systemie klimatycznym jest tzw. **cyrkulacja termohalinowa**, czyli ogół prądów morskich głębinowych i powierzchniowych. Są one napędzane przez zróżnicowanie temperatur i zasolenia wody oraz wiatry wiejące w atmosferze. Temperatura i zasolenie wody wpływają na jej gęstość – jest ona tym większa, im woda jest chłodniejsza i im więcej soli zawiera. Gdy warunki powodują, że na powierzchni morza woda staje się chłodna i słona, to opada ona w głąb oceanu. Zjawisko to zachodzi regularnie na skraju Oceanu Arktycznego i w okolicach Półwyspu Antarktycznego. To opadanie napędza cyrkulację w całym wszechoceanie. Woda opadająca na dno nie może się tam przecież gromadzić bez przerwy, musi popłynąć gdzieś wzdłuż dna, jednocześnie na miejsce wody opadającej z powierzchni napływa woda z niższych szerokości geograficznych itd.

Masowe i coraz szybsze topnienie dużych mas lodu oznacza uwalnianie do oceanu dużych ilości słodkiej wody, która ze względu na mniejszą gęstość ma tendencję do pozostawania na powierzchni zbiornika. Zaburza to dotychczasową cyrkulację i wpływa na prędkość i geograficzny układ prądów morskich. Niestety badanie tego zjawiska jest bardzo trudne, zwłaszcza że cyrkulacja termohalinowa podlega także licznym naturalnym fluktuacjom. Nie ma na razie zgody co do tego, czy już obecnie mamy do czynienia z istotnym zaburzeniem tego zjawiska przez ocieplenie klimatu. Z analiz wynika, że punkt krytyczny związany z zahamowaniem prądów morskich w rejonie Atlantyku leży prawdopodobnie w zakresie $3\text{--}5^\circ\text{C}$ ocieplenia względem czasów przedprzemysłowych (Steffen i in., 2018).

Układ prądów morskich i związana z nim temperatura oceanu ma istotny wpływ na pogodę w poszczególnych częściach globu, ponieważ decyduje o sile i miejscach występowania zjawisk takich jak burze, silne opady czy susze. Ewentualne spowolnienie cyrkulacji atlantyckiej przyniosłoby Europie Zachodniej ochłodzenie i silniejsze sztormy.



Więcej o projekcjach poziomu morza przeczytasz w tekście

Wzrost poziomu morza – prognozy coraz bardziej pesymistyczne »

CZY WIESZ, ŻE ?

Obszar przybrzeżny nie musi znajdować się stale pod wodą, by jego użytkowanie było utrudnione w związku ze wzrostem poziomu morza. Nawet okresowe (np. raz do roku) wtargnięcia wody na ląd oznaczają zagrożenie dla infrastruktury, źródeł wody pitnej czy jakości gleby.

WIELOLETNIA ZMARZLINA

Jak już wiesz, regionem szczególnie narażonym na ocieplanie się klimatu jest północna strefa podbiegunowa. Duże obszary leżących tu łądów pokrywa **wieloletnia zmarzlina**, czyli gleba ze szczątkami organicznymi pozostająca w temperaturze poniżej zera przez co najmniej dwa lata. Ocieplenie oznacza, że kolejne warstwy podłoża zaczynają tu coraz częściej rozmarzać, co skutkuje między innymi naruszeniem stabilności gruntu oraz emisjami dwutlenku węgla i metanu ze szczątków organicznych, które w dodatnich temperaturach zaczynają podlegać rozkładowi.

W bieżącym stuleciu spodziewany jest wielkopowierzchniowy zanik wieloletniej zmarzliny. W scenariuszu RCP2.6 topnienie obejmie 2–66% a w RCP8.5 30–99% jej powierzchni. W rezultacie do atmosfery uwolnione zostaną dziesiątki lub setki miliardów ton węgla (do 240GtC). Chociaż masowy udział metanu w tych emisjach będzie nieduży, gaz ten będzie jednak odpowiadać za 40–70% wkładu topnienia zmarzliny w dalsze ocieplanie się klimatu (Pörtner i in., 2019).

Chociaż prawdopodobnie topnienie zmarzliny stanie się niemożliwe do zatrzymania dopiero, gdy średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrośnie o ponad 5°C względem epoki przedprzemysłowej (Steffen i in., 2018), to nawet przy mniejszym ociepleniu dodatkowe emisje gazów cieplarnianych z tego źródła mogą znacząco wpłynąć na klimat.

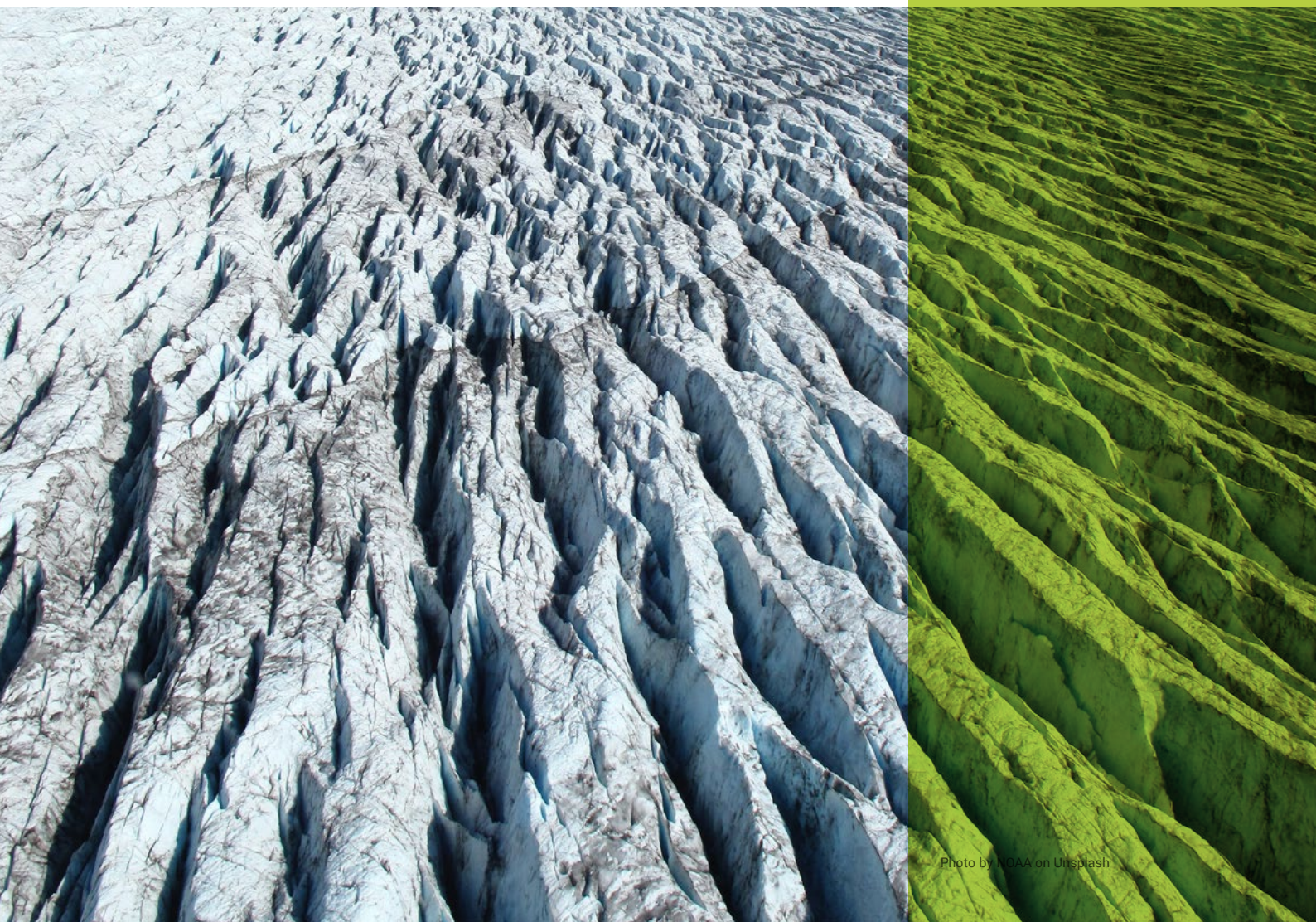


Więcej na temat konsekwencji zmiany klimatu przeczytasz w kolejnej lekcji oraz tekstach

1,5°C... 2°C... 3°C... 4°C
– porównanie następstw zmiany klimatu »

Konsekwencje zmiany klimatu dla Polski wg Ministerstwa Środowiska »

Ziemia „stabilna” czy „cieplarniana”? »





KLIMATYCZNE ABC

ANDRZEJ MIKULSKI
BARBARA PIETRZAK

Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę ożywioną?

Postępujące zmiany klimatu oddziałują na żywe organizmy w bardzo różnorodny i złożony sposób. Zmiany cyklu obiegu wody wpływają na jej dostępność dla organizmów. Zmiany temperatury i innych parametrów fizykochemicznych środowiska bezpośrednio i pośrednio oddziałują na poszczególne osobniki, ich populacje i całe gatunki. Konsekwencją nawet lokalnej ekstynkcji może być przebudowa całego ekosystemu, a zmiany w funkcjonowaniu ekosystemów oddziałują zwrótnie na klimat. Tymczasem działalność człowieka wywiera różne bezpośrednie presje na ekosystemy naturalne i ich składowe – ich mieszkańców.

LOKALNA EKSTYNKCJA – zanik populacji gatunku (też podgatunku, rodzaju itp.) na danym obszarze jego występowania, przy jednoczesnym istnieniu innych jego populacji na innych obszarach (w przeciwieństwie do ekstynkcji globalnej – wymarcia).

**DEFINICJA
LOKALNA
EKSTYNKCJA**

Z tej lekcji dowiesz się, jak zmiana klimatu wpływa na dostępność wody dla organizmów żywych i w jaki sposób to organizmy zatrzymują wodę w ekosystemie, umożliwiając jej późniejsze wykorzystanie przez innych. Zobaczysz też, jak zdegradowane przez suszę ekosystemy wpływają zwrótnie na klimat. W kolejnej części poznasz bezpośrednie konsekwencje rosnących temperatur oraz odpowiedzi poszczególnych osobników i budowanych przez nie zespołów. Zobaczysz, że organizmy nie zawsze mogą przenieść się w bardziej dogodne miejsce lub mieć czas zaadaptować się do zmienionych warunków. Konsekwencją tego są lokalne ekstynkcje. Część poświęcona różnorodności biologicznej pokazuje mechanizmy prowadzące do przebudowy całych ekosystemów w wyniku pozornie niewielkich zmian, jak na przykład lokalna ekstynkcja jednego z setek tworzących ten ekosystem gatunków. W rozdziale o bezpośrednich relacjach człowieka z resztą biosfery przeczytasz o tym, jak człowiek na różne sposoby prowadzi do jej zubożenia. Przedstawimy dane wskazujące przyczyny i skalę zachodzących w biosferze zmian. Wreszcie, w części ostatniej piszemy o tym, dlaczego różnorodność biologiczna jest kluczowa dla funkcjonowania człowieka i jego gospodarki. Lekcję zakończymy, wracając do problemu sprzężeń zwrotnych i omówimy kolejny przykład, jak zmiany w biosferze mogą wpływać na klimat.

Dostępność wody

Wraz ze zmianą klimatu maleje dostępność wody słodkiej dla organizmów żywych, a to w znacznej mierze one zatrzymują wodę w krajobrazie i umożliwiają jej późniejsze wykorzystanie. Następująca wskutek suszy degradacja całych ekosystemów zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnej suszy i wpływa zwrótnie na klimat.

ZMIANY KLIMATU GENERUJĄ DEFICYTY WODY

Jednym z najdotkliwszych dla ekosystemów skutków zmiany klimatu jest ograniczenie dostępności słodkiej wody. Wynika to ze znacznego zwiększenia tempa parowania z powierzchni lądów i wód śródlądowych. Tempo parowania zależy silnie od temperatury wody na styku faz woda-powietrze (im wyższa, tym jest silniejsze), a temperatura ta gwałtownie rośnie w przypadku nawet krótkotrwałych upałów. Zjawiskiem najsilniej generującym suszę jest więc występowanie długich okresów bezdeszczowych stowarzyszonych z wysoka temperaturą.

DOSTĘPNOŚĆ WODY NA LĄDACH ZALEŻY ZNACZĄCO OD TEMPA JEJ PAROWANIA I SPOWALNIANIA JEJ ODPLYWU DO MÓRZ

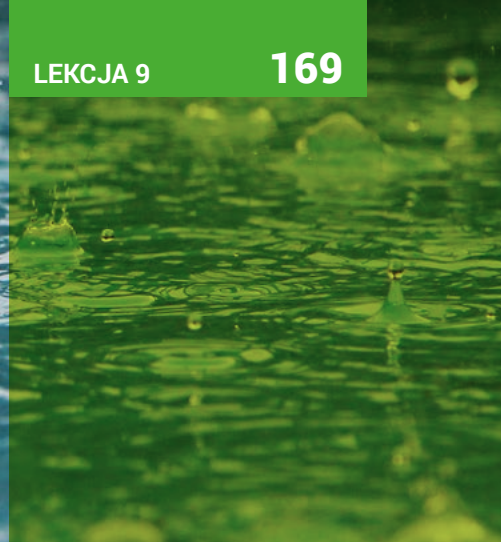
Większość wody spadającej wraz z deszczem na powierzchnię ziemi wyparowuje. W Polsce jest to około 73% opadu. Reszta wody różnymi drogami i w różnym tempie spływa do mórz. Gdyby świat wyglądał jak szczelnie wybetonowane miasta, woda byłaby dostępna dla organizmów (w tym człowieka) jedynie w trakcie opadów lub krótki czas po nich – szybko spłynęłaby w dół, generując po drodze krótkotrwałą powódź. Obecność wody poza okresami opadów zapewnia nam retencja, czyli zjawisko zatrzymywanie wody opadowej w krajobrazie.

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 Nadal przeszło 60% słodkiej wody na Ziemi jest zgromadzonej w formie lodu i śniegu. Z każdym rokiem coraz więcej tej wody spływa do oceanów, zaburzając jego funkcjonowanie poprzez lokalne zmiany zasolenia.

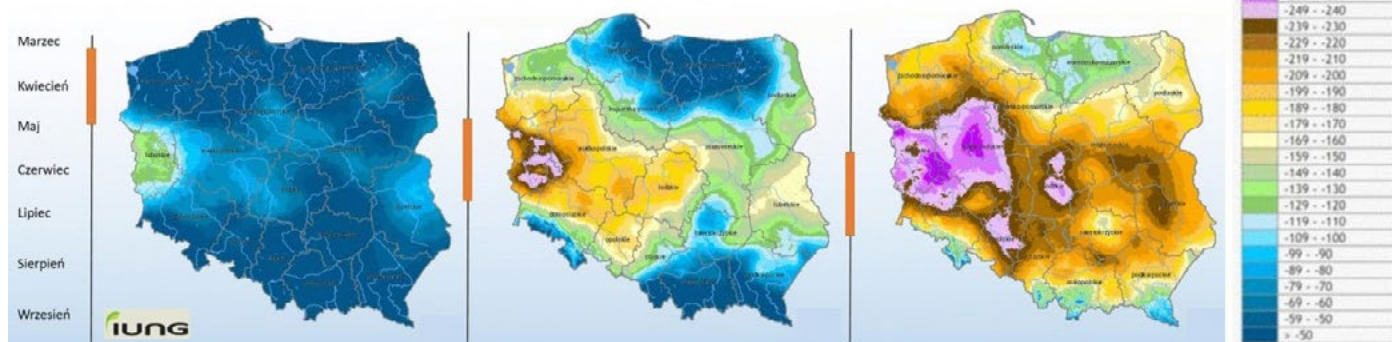
RETENCJA WODNA – zdolność do gromadzenia i przetrzymywania wody przez ożywione i nieożywione elementy środowiska, takie jak szata roślinna, gleba, wody powierzchniowe czy śnieg i lód.

DEFINICJA
RETENCJA WODNA



Klimatyczny Bilans Wodny 2019

Różnica pomiędzy opadem atmosferycznym a potencjalnym parowaniem



Rysunek 1: Klimatyczny bilans wodny 2019. Ujemne wartości oznaczają parowanie przewyższające opad.

Źródło: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach.

EFEKTYWNĄ RETENCJĘ ZAPEWNIĄJĄ BOGATE ZBIOROWISKA ROŚLINNE

Istotę retencji najlepiej zrozumieć stojąc, pod drzewem w czasie deszczu. Na początku opadów nic na nas nie kapie. Po jakimś czasie z drzewa zaczynają spadać pojedyncze krople i kapią długo po zakończeniu deszczu. Drzewo działa więc jak, gąbka wchłaniając opad i zasilając środowisko w wodę po deszczu. Obecność takich środowiskowych gąbek jest niezbędna dla funkcjonowania ekosystemów i gospodarki człowieka. Są nimi przede wszystkim torfowiska, lasy i bogata w próchnicę gleba. Dzięki sprzyjającemu retencji środowisku woda opadowa wnika efektywnie w ziemię i jest gromadzona w formie wód podziemnych. Redukuje to ryzyko jej utraty w wyniku parowania, oczyszcza ją, chroni przed zanieczyszczeniami i zabezpiecza jej zasoby na dłuższe okresy bezdeszczowe.

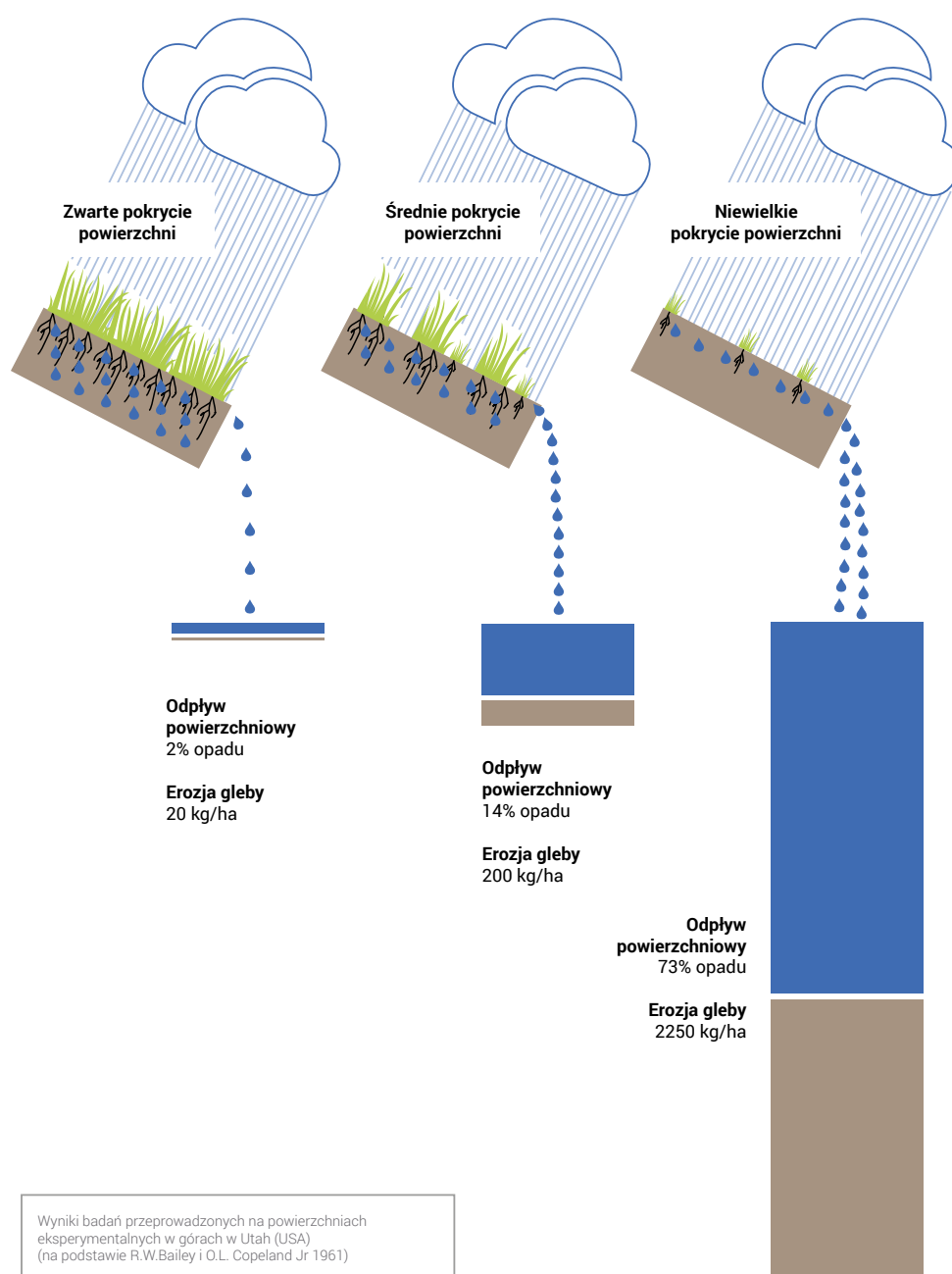
RETENCJA W POLSCE JEST W KIEPSKIM STANIE

Retencyjność środowiska w Polsce pogarsza się zamiast poprawiać. Dla bilansu wodnego kraju szczególnie ważne jest zatrzymywanie wody w górach, gdzie spada znaczna część wody deszczowej. Retencji nie sprzyja więc intensyfikacja wycinki i degradacja górskich lasów, szczególnie starodrzewów. Woda opadowa niezatrzymywana przez las spływa do uregulowanych strumieni i jest szybko wyprowadzana na niziny, a potem do morza. Pogorszenie retencji w obliczu oczekiwanego pogorszenia się bilansu wodnego stanowi poważne zagrożenie dla funkcjonowania ekosystemów i gospodarki człowieka.

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 Jeden kilogram torfu może zatrzymać (retencjonować) do 12 kg wody.

Rysunek 2: Pokrycie powierzchni roślinnością a odpływ powierzchniowy.



O obserwowanych i przewidywanych zmianach w temperaturach występujących w naszym kraju przeczytasz w książce:

Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce »

Za pogorszenie retencyjności odpowiadają także tak zwane prace utrzymaniowe na ciekach. Jednym z ich głównych celów jest udrażnianie rzek i przyspieszanie odpływu wody z krajobrazu. Działania takie wynikają w dużej mierze z wadliwego prawa (są formalnie obowiązkiem administratora wód) i braku wiedzy lokalnych społeczności (braku dostrzegania związku pomiędzy ograniczaniem wiosennych podtopień łąk i pól i późniejszą suszą).

Udrażnianie cieków polega zazwyczaj na usunięciu osadów dennych i wyrównaniu rzecznej koryta. W ciągu ostatnich lat przekopano w Polsce kilkadziesiąt tysięcy kilometrów niewielkich rzek, osuszając skutecznie znaczne powierzchnie naszego kraju.

Wbrew powszechnej opinii, zbiorniki zaporowe, zwłaszcza te o stałym poziomie piętrzenia, nie pełnią dobrze funkcji retencyjnej. Nie zatrzymują wody deszczowej, a jedynie ją przez siebie przepuszczają.

WYSYCHANIE ŚRODOWISKA JEST WAŻNĄ PRZYCZYNĄ DEGRADACJI EKOSYSTEMÓW

Dostępność wody jest jedną z ważnych cech bezpośrednio kształtujących strukturę ekosystemu. Od niej zależy charakter szaty roślinnej, a ta wpływa istotnie na inne organizmy, nawet jeżeli nie są one bezpośrednio ograniczane przez niedostatek wody. Głęboka susza może prowadzić do nagłego zaniku niektórych ekosystemów takich jak drobne zbiorniki wodne lub rzeki. Susza zwiększa też prawdopodobieństwo wystąpienia pożarów, wpływa na ich zasięg i intensywność. Stanowi istotną przyczynę spadku bioróżnorodności zarówno w ujęciu globalnym, jak i lokalnym.

RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA – też **BIORÓŻNORODNOŚĆ** – to zróżnicowanie organizmów żyjących we wszystkich ekosystemach, np. lądowych, słodkowodnych i morskich, oraz zróżnicowanie całych układów ekologicznych, których te organizmy są częścią; obejmuje zróżnicowanie w obrębie gatunku, międzygatunkowe i ekosystemowe.

DEFINICJA
RÓŻNORODNOŚĆ
BIOLOGICZNA

CZY WIESZ, ŻE ?

Podatność świerków na presję kornika zależy istotnie od wilgotności środowiska. Susza była więc jedną z przyczyn intensywności gradacji kornika w Puszczy Białowieskiej.

ZE ZJAWISKIEM SUSZY ZWIĄZANE JEST PROSTE I SZYBKIE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Poprzez degradację ekosystemów susza zmniejsza zdolności retencyjne krajobrazu, zwiększając prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnej suszy. Degradacja roślinności upośledza jej bezpośrednią zdolność do zatrzymywania wody i likwiduje zacienienie ograniczające parowanie wody z gruntu. Woda opadowa znacznie gorzej wnika w suche podłoże, co zwiększa intensywność spływu powierzchniowego i szybkiego odpływu wody do rzeki. Susza powoduje degradację gleb i torfowisk, zmniejszając ich zdolności do retencji i powodując tym samym uwalnianie olbrzymich ilości dwutlenku węgla do atmosfery (w glebach jest go wciąż więcej niż w atmosferze – por. z lekcją o cyklu węgla). Ogromne skokowe emisje dwutlenku węgla powodują też wywołane przez suszę pożary.



Wpływ zmian klimatu na osobniki, populacje, gatunki

Rosnące temperatury oddziałują na organizmy bezpośrednio i pośrednio. Zmiany obecnie zachodzą szybko, a wiele organizmów ani nie może przemieścić się w bardziej dogodne miejsce, ani nie ma czasu zaadaptować się do zmienionych warunków. Konsekwencją tego są lokalne ekstynkcje.

ZMIANA KLIMATU POWODUJE PRZESUWANIE SIĘ ZASIĘGÓW ORGANIZMÓW

Każdy organizm na Ziemi posiada swoją unikalną niszę ekologiczną, a więc zdefiniowany zespół warunków środowiskowych, w jakich może funkcjonować. Każdy klimat umożliwia funkcjonowanie różnym zestawom (zespołom) organizmów, dla których warunki te są korzystne. Zmiany klimatu oznaczają de facto przesunięcia obszarów, na których można by spotkać konkretny zestaw organizmów w stronę biegunów lub w ekosystemach górskich, wyżej. Powinno to prowadzić do przesunięcia się w przestrzeni zasięgu gatunków i ich zespołów. Zmiany takie obserwujemy już w naturze.

NISZA EKOLOGICZNA – wielowymiarowa przestrzeń zdefiniowana poprzez zakresy wartości parametrów środowiskowych (np. temperatur, ilości docierającego światła, dostępnego pokarmu lub budulca, zagęszczenia drapieżników lub konkurentów) wyznacza warunki umożliwiające przeżycie osobnika (nisza potencjalna) lub opisuje warunki, jakich osobnik doświadcza w trakcie życia (nisza zrealizowana).

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 W skutek zmiany klimatu sosna zwyczajna, świerk pospolity, modrzew europejski oraz brzoza brodawkowata będą występować zdecydowanie rzadziej na obszarze Polski.

DEFINICJA NISZA EKOLOGICZNA



Notki o drzewach w Europie:

Ocieplenie klimatu oznacza zmiany dla gospodarki leśnej »

Naukowcy z PAN prognozują: za kilkadziesiąt lat z polskich lasów może zniknąć 75% gatunków drzew »

O pomidorze na Giewoncie

Pomidor na Giewoncie. Coraz więcej roślin zdobywa szczyty gór »

TEMPO ZMIAN UTRUDNIA ADAPTACJĘ SYSTEMÓW BIOLOGICZNYCH

Każda populacja ma w pewnym zakresie potencjał do adaptacji, do zmiany warunków środowiskowych. Adaptacja taka nie jest jednak szybka. Przesuwanie się zasięgów gatunków w przestrzeni także nie jest procesem prostym i szybkim. Na przykład naturalny cykl wymiany gatunków w lesie trwa od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu lat (patrz: podlinkowane materiały). Zbyt szybkie zmiany warunków środowiskowych oznaczać mogą masową i długotrwałą degenerację ekosystemów oraz ekstynkcję tworzących je populacji. Możliwość przesuwania zasięgów ku biegunom jest ograniczona także chociażby przez różną długość dnia i nocy na różnych szerokościach geograficznych. Część populacji nie jest w stanie się przemieścić w przestrzeni, bo niezbędne dla nich warunki nie występują w zasięgu możliwej migracji. Tak dzieje się na przykład z ekosystemami raf koralowych, wrażliwych na wysokie temperatury i obniżone pH.

ZMIANY KLIMATYCZNE WPŁYWAJĄ NA POPULACJE TAKŻE POŚREDNIO

Temperatura jest czynnikiem wpływającym na wiele aktywności i cech organizmów. U wielu gatunków gadów i ryb to temperatura inkubacji jaj decyduje o płci nowo narodzonych osobników. Ocieplenie może więc zaburzyć naturalne proporcje pomiędzy samcami i samicami, zaburzając funkcjonowanie populacji.

Jak wiesz z lekcji o cyklu węglowym, szybkie zakwaszanie oceanów wiąże się ze spadkiem dostępności jonów wodorowęglanowych, niezbędnych do funkcjonowania wszelkich organizmów wykorzystujących węglan wapnia do budowania zewnętrznych szkieletów, począwszy od mikroskopijnych planktonowych otwornic po kilkusetkilogramowe małże przydacznie (*Tridacna*) i koralie rafotwórcze. Może to doprowadzić do wyginięcia wielu z tych organizmów

Stowarzyszone z ociepleniem klimatu podnoszenie się poziomu wody w oceanach generuje destabilizację i postępującą degradację ekosystemów związanych z morskim brzegiem. Powoduje na przykład zniszczenie (zalanie) podmorskich torfowisk i lasów namorzynowych oraz ekstynkcję wielu bytujących tam populacji.

ZMIANY KLIMATU PROWADZĄ DO EKSTYNKCJI GATUNKÓW

Z powodu szybkości zmian klimatycznych wiele populacji organizmów nie jest w stanie zaadaptować się do zmieniających się warunków, ani przemieścić do zastępczych siedlisk. Jest to jeden z czynników sprawczych utraty bioróżnorodności zarówno w ujęciu lokalnym, jak i globalnym. Często trudno jest stwierdzić, czy gatunek jest zagrożony lub znikł w wyniku zmian klimatu, czy z innych antropogenicznych przyczyn. Niemniej bez wątpienia klimatyczny komponent ekstynkcji gatunków jest coraz częściej zauważalny i opisywany.



Ocieplenie zabija rafę »



Photo by Jose Aragones on Unsplash

Różnorodność biologiczna a funkcjonowanie ekosystemów

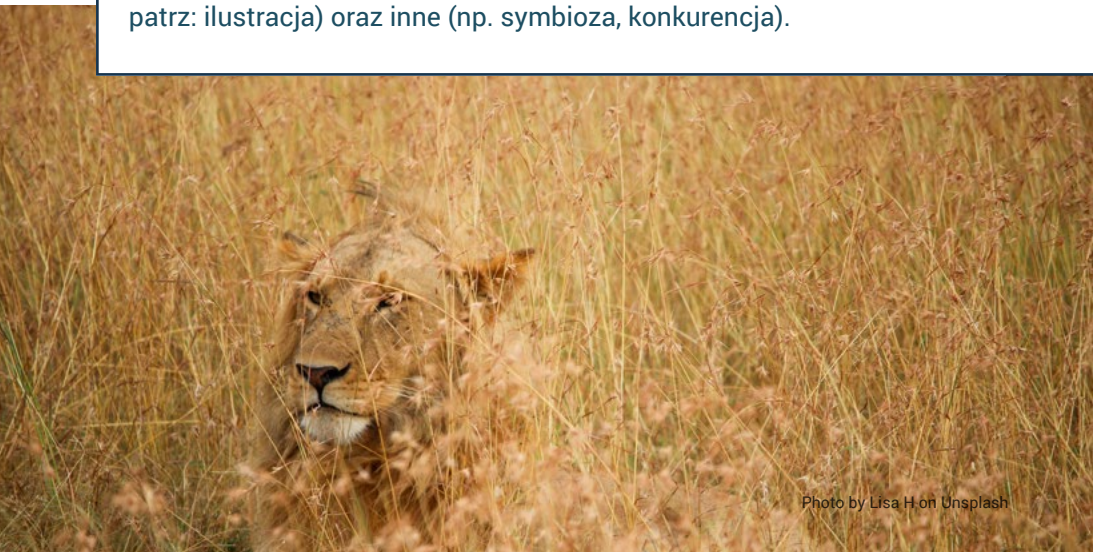
Organizmy żywe powiązane są ze sobą siecią różnych zależności. Stąd nawet pozornie niewielkie zmiany – na przykład lokalna ekstynkcja tylko jednego z setek gatunków – mogą prowadzić do przebudowy całych ekosystemów.

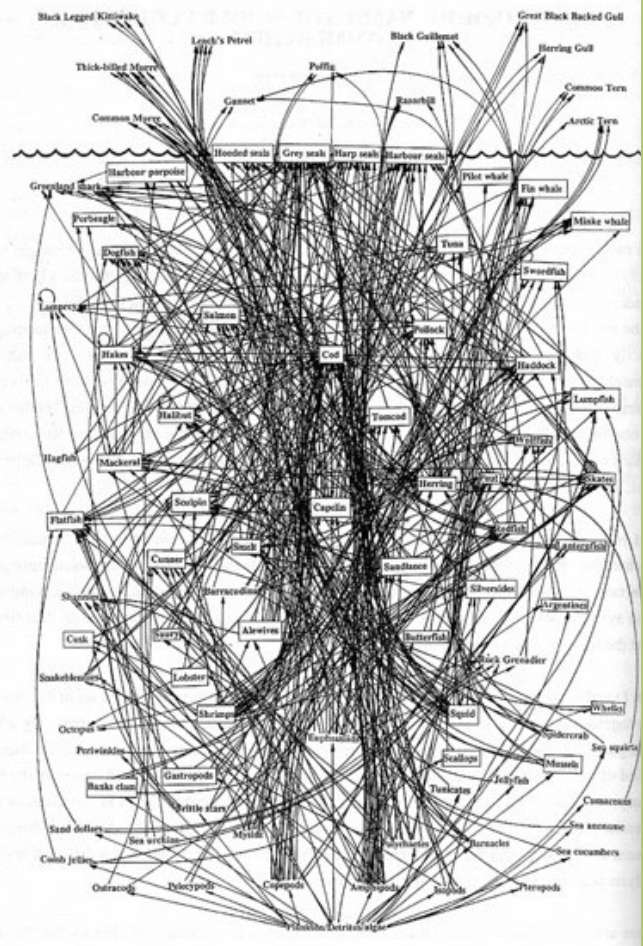
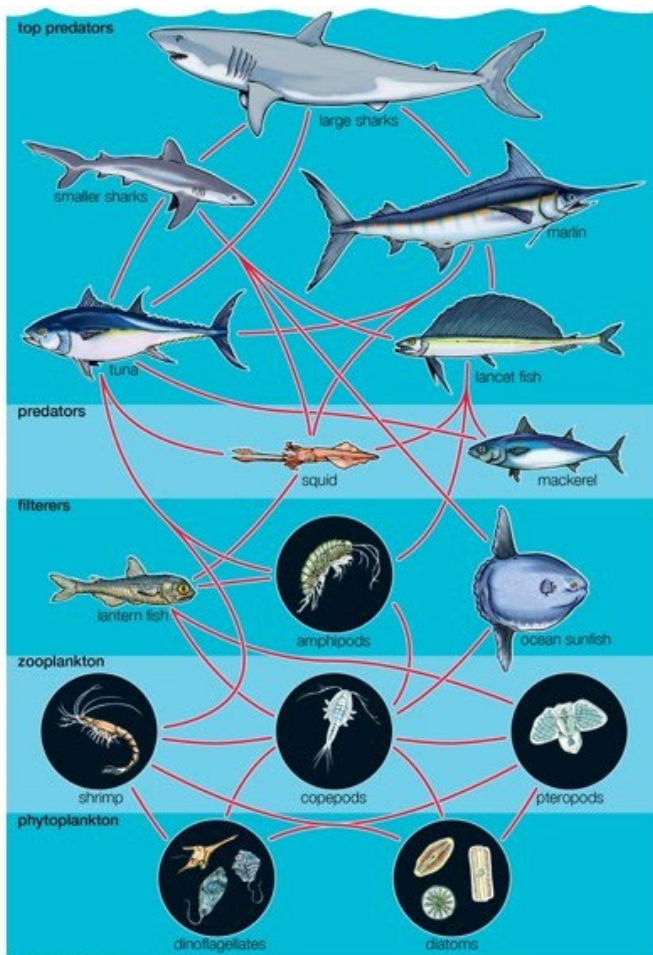
RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA MOŻE BYĆ ANALIZOWANA NA RÓŻNYCH POZIOMACH ORGANIZACJI ŻYCIA

Różnorodność biologiczna potocznie jest utożsamiana z **różnorodnością gatunkową**, czyli liczbą gatunków występujących na jakimś terenie, od drobnego fragmentu siedliska do całej biosfery. Termin ten ma jednak dużo szersze znaczenie. Różnorodność może dotyczyć **zróżnicowania genetycznego w obrębie populacji** i stanowić ważką przesłankę dotyczącą jej trwałości – zróżnicowane genetycznie populacje są zazwyczaj bardziej odporne na zaburzenia i są w stanie przetrwać dłużej. Zróżnicowanie biologiczne możemy też analizować w odniesieniu do większych zgrupowań organizmów, takich jak zespoły czy **biocenozy**. W takich przypadkach szczególnie ważna jest **różnorodność funkcjonalna**, definiowana przez zależności pomiędzy organizmami tworzącymi biocenozę (np. różne owady pełnią funkcje zapylaczy, destruents, tzn. biorą udział w rozkładzie martwej materii organicznej czy są pokarmem dla większych zwierząt). Zazwyczaj bardziej zróżnicowane gatunkowo biocenozy charakteryzują się większym zróżnicowaniem funkcjonalnym, mają większą produktywność i są bardziej odporne na zaburzenia.

BIOCENOZA – biologiczna część ekosystemu. Wyróżnialny funkcjonalnie ogół powiązanych ze sobą organizmów zasiedlających jeden obszar. Powiązania obejmują zależności pokarmowe (sieć pokarmowa, inaczej: troficzna, patrz: ilustracja) oraz inne (np. symbioza, konkurencja).

DEFINICJA
BIOCENOZA





Rysunek 3: Biocenoza oceaniczna. Obie ilustracje przedstawiają uproszczoną sieć powiązań pokarmowych między tworzącymi biocenozę organizmami.

Źródła: Encyclopaedia Britannica 2010 (po lewej); IMMA / Prof. David Lavigne, NSERC (po prawej).

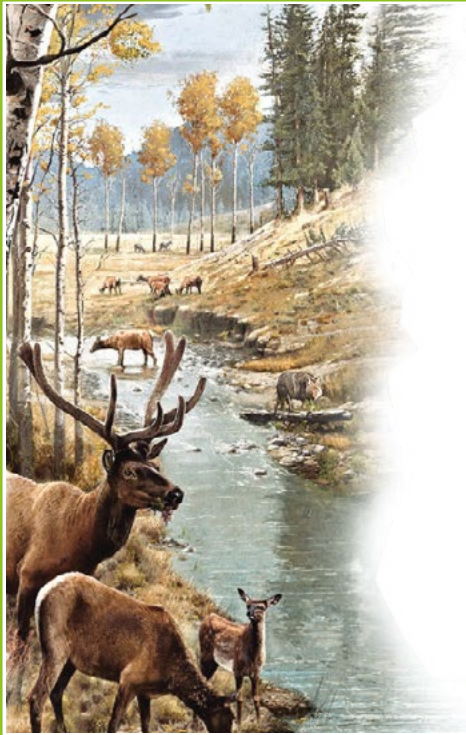
UTRATA BIORÓŻNORODNOŚCI MOŻE PROWADZIĆ DO DESTABILIZACJI EKOSYSTEMÓW

Widoczne zaburzenie stanu ekosystemu dokonuje się często nagle, po przekroczeniu pewnego progu nasilenia zmian środowiskowych lub ekstynkcji gatunków niezbędnych dla prawidłowego jego funkcjonowania. Może to być zanik kilku gatunków pełniących w ekosystemie podobną funkcję (należących do tzw. gildii, patrz wyżej na niektóre funkcje pełnione przez owady) lub zanik jednego gatunku, niezbędnego dla przebiegu procesów w ekosystemie. Gatunek taki nazywamy **gatunkiem zwornikowym** lub **kluczowym** (*keystone species*). Nazwa pochodzi od środkowego elementu łuku architektonicznego – jego usunięcie powoduje zawalenie konstrukcji.

GATUNEK ZWORNIKOWY (KLUCZOWY) – ma nieproporcjonalnie do swej liczebności duży wpływ na zespół organizmów, w którym występuje. Kontrolując populacje innych gatunków, które w innym przypadku zdominowałyby zespół, lub zapewniając zasoby krytyczne dla szerokiej gamy gatunków, wspiera utrzymanie lokalnej różnorodności biologicznej. Np. korale rafowe, bóbr, wydra morska, wilk.

DEFINICJA GATUNEK ZWORNIKOWY

Reintrodukcja wilka jako szczytowego drapieżcy w Parku Yellowstone wywołała kaskadę zmian.



BEZ WILKÓW

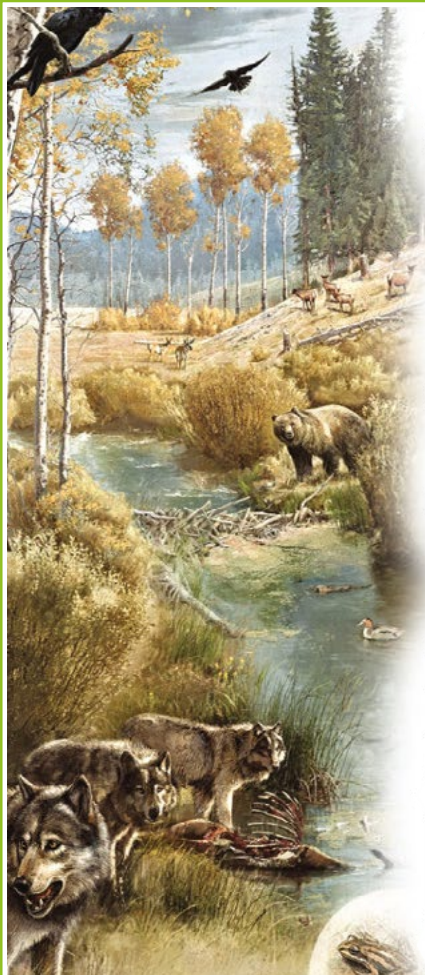
Jelenie z rozrastającej się, nie-regulowanej przez drapieżców populacji zjadły wierzby, topole i krzewy, które zapobiegały erozji brzegów rzek. Ptakom zabrakło miejsc na gniazda. Z nagrzewanych słońcem, niezacienionych strumieni o wyerodowanych brzegach zniknęły ryby i bezkręgowce.

Młode osiki z północnych dolin parku, gdzie zimują jelenie, nie miały szansy dorosnąć.

Rozrosła się nieograniczona przez konkurencję populacja kojotów, które polują głównie na małe ssaki, w tym norniki i inne gryzonie. Zabrakło pożywienia dla lisów, borsuków, łasic i ptaków drapieżnych.

W efekcie dominuje roślinność nieleśna, retencjonująca znacznie mniej wody i mniej efektywnie magazynuje węgiel.

KONSEKWENCJE DLA KLIMATU



Z WILKAMI

Jelenie jest o połowę mniej. Strach przed drapieżnikami utrzymuje je z dala od brzegów strumieni, są bezpieczniejsze wyżej, na zalesionych stokach dolin.

Siewki osiki nie są już tak intensywnie wyjadane, osikowe gaje porastają doliny.

Wierzby, topole i inne rośliny zaczęły stabilizować brzegi strumieni, pomagając przywrócić naturalny przepływ wody. Ich gałęzie zacieniają wodę, a wśród gałęzi goszczą ptaki.

Dzięki obfitości pożywienia, przede wszystkim wierzb, rozrosła się populacja bobrów. Wskutek budowy przez bobry tam tworzą się małe zbiorniki i rozlewiska, zasiedlane przez owady, ryby, płazy, ptaki i małe ssaki.

Resztkami z wilczych posiłków żywią się padlinożercy: bieliki, orły, kruki, sroki, niedźwiedzie i nieliczne teraz kojoty.

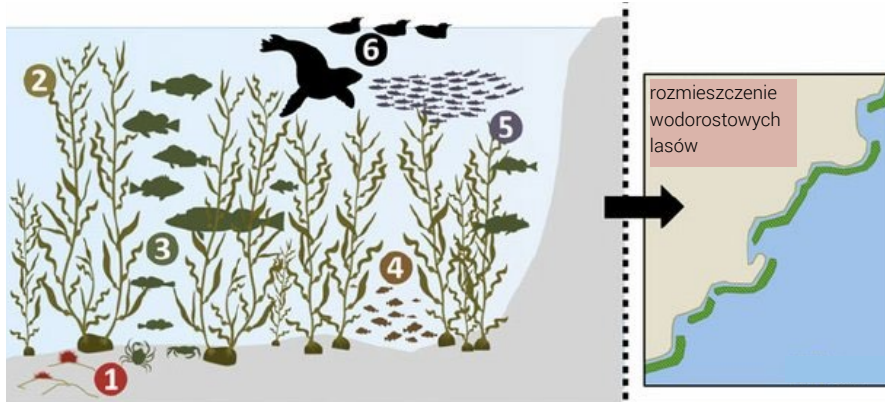
Krajobraz zdominowany jest przez naturalne ekosystemy leśne, stanowiące znaczący magazyn węgla organicznego, a na etapie intensywnego wzrostu szybko go magazynujące. Jednocześnie taki krajobraz retencjonuje większe ilości wody, a drzewa – poprzez wyższą ewapotranspirację niż rośliny zielne – przywracają więcej wody do lokalnego obiegu, schładzając jednocześnie mikroklimat.

KONSEKWENCJE DLA KLIMATU

Ewapotranspiracja – „parowanie terenowe”, obejmujące łącznie procesy parowania i transpiracji, czyli transportowania wody przez rośliny i jej parowania z ich nadziemnych części. Ewapotranspiracja ze stanowiska roślinności jest tym większa, im większa jest łączna powierzchnia liści w przeliczeniu na jednostkę powierzchni.

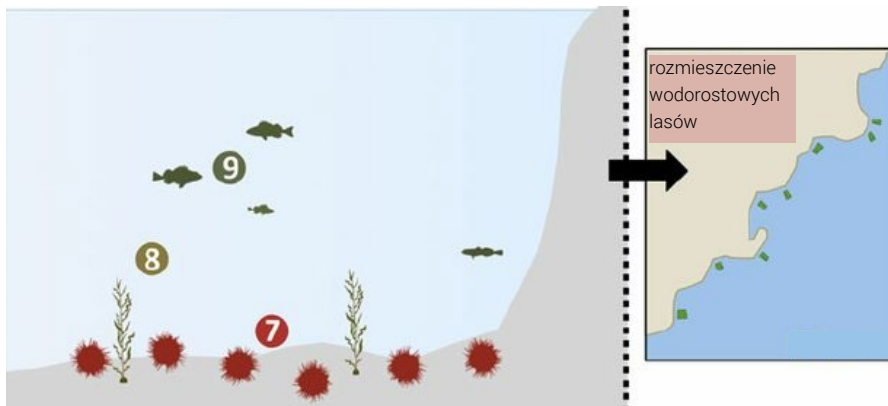
Porównanie biocenoz zdominowanych przez wydrę morską i jeżowca.

WYDRY OBECNE



(1) Wskutek drapieżnictwa wydr morskich jeżowce są ograniczone do małych osobników, pochowanych w szczelinach i na większych głębokościach. (2) Liczebność roślinożernych jeżowców kontrolowana jest przez drapieżców, stąd lasy wodorostowe rozrastają się bujnie. (3) Dzięki dostępności pokarmu roślinnego i struktury zapewnianej przez wodorostowe lasy występuje wiele gatunków z nimi związanych. (4) To siedlisko jest ważnym miejscem żerowania młodych ryb, co może pozytywnie wpływać na liczebność większych ryb (3). (5) Małe gatunki (np. śledź) mogą wykorzystywać wodorosty do tarła. (6) Dzięki dużej produktywności środowiska, inne duże drapieżniki (ssaki morskie i ptaki) są także liczne.

WYDRY NIEOBECNE, DOMINACJA JEŻOWCA



(7) Uwolnione spod presji drapieżców jeżowce osiągają duże rozmiary i rozprzestrzeniają się równomiernie. (8) Wskutek wyżerania przez jeżowce, lasy wodorostowych nie ma lub są bardzo ograniczone. (9) Innych konsumentów nie ma lub są nieliczni.

Źródło: Szpak i in., (2013). Regional ecological variability and impact of the maritime fur trade on nearshore ecosystems in southern Haida Gwaii (British Columbia, Canada) *Archaeol. Anthropol. Sci.* 5: 159–182.

Nigdy do końca nie wiadomo, ile i jakich gatunków można usunąć z systemu, nie powodując drastycznych skutków. Usunięcie każdego elementu osłabia system i czyni go podatniejszym na zaburzenia. Zubożony ekosystem może więc często funkcjonować w miarę prawidłowo do momentu, kiedy zmiana warunków środowiskowych nie wytrąci go ze stanu równowagi.

„Hipoteza wypadających nitów” (*rivet popping hypothesis*) znakomicie obrazuje problem podatności ekosystemów na ekstynkcję gatunków. Jej twórcy, Paul i Anne Ehrlich, ukazują samolot, którego konstrukcja spojona jest nitami. Nie wszystkie są niezbędne, aby samolot w normalnych warunkach był funkcjonalny. Usuwanie kolejnych nitów pozostaje niezauważone do momentu, gdy pogarszające się warunki środowiskowe naruszają osłabioną konstrukcję lub usunie się zbyt dużo nitów, aby konstrukcja była stabilna nawet w optymalnych warunkach.

Odbudowa po zakłóceniach

PODCZAS ZAKŁÓCENIA

A



REGENERACJA PO ZAKŁÓCENIU



Ekosystemy intensywnie zarządzane często są uproszczone troficznie. Bariery między ekosystemami utrudniają przemieszczanie się osobników, szczególnie tych z wyższych poziomów troficznych. Ogranicza się występowanie naturalnych zakłóceń, jak np. okresowe pożary, co zwiększa szansę wystąpienia zakłóceń znacznie większych. Ubóstwo gatunkowe i bariery dla rozprzestrzeniania się spowalniają odbudowę biocenoz po zakłóceniach.

PODCZAS ZAKŁÓCENIA

B



REGENERACJA PO ZAKŁÓCENIU



W ekosystemach, w których zezwala się na zachodzenie naturalnych procesów, sieci troficzne są złożone: funkcjonują producenci, roślinożercy i szczytowi drapieżcy. Jeśli zapewni się połączenia między siedliskami, mogą oni swobodnie przemieszczać się, odbudowując lokalne biocenozy po niewielkich zakłóceniach.



zakłócenie



sieć troficzna



dyspersja



producenci



roślinożercy



szczytowi drapieżcy

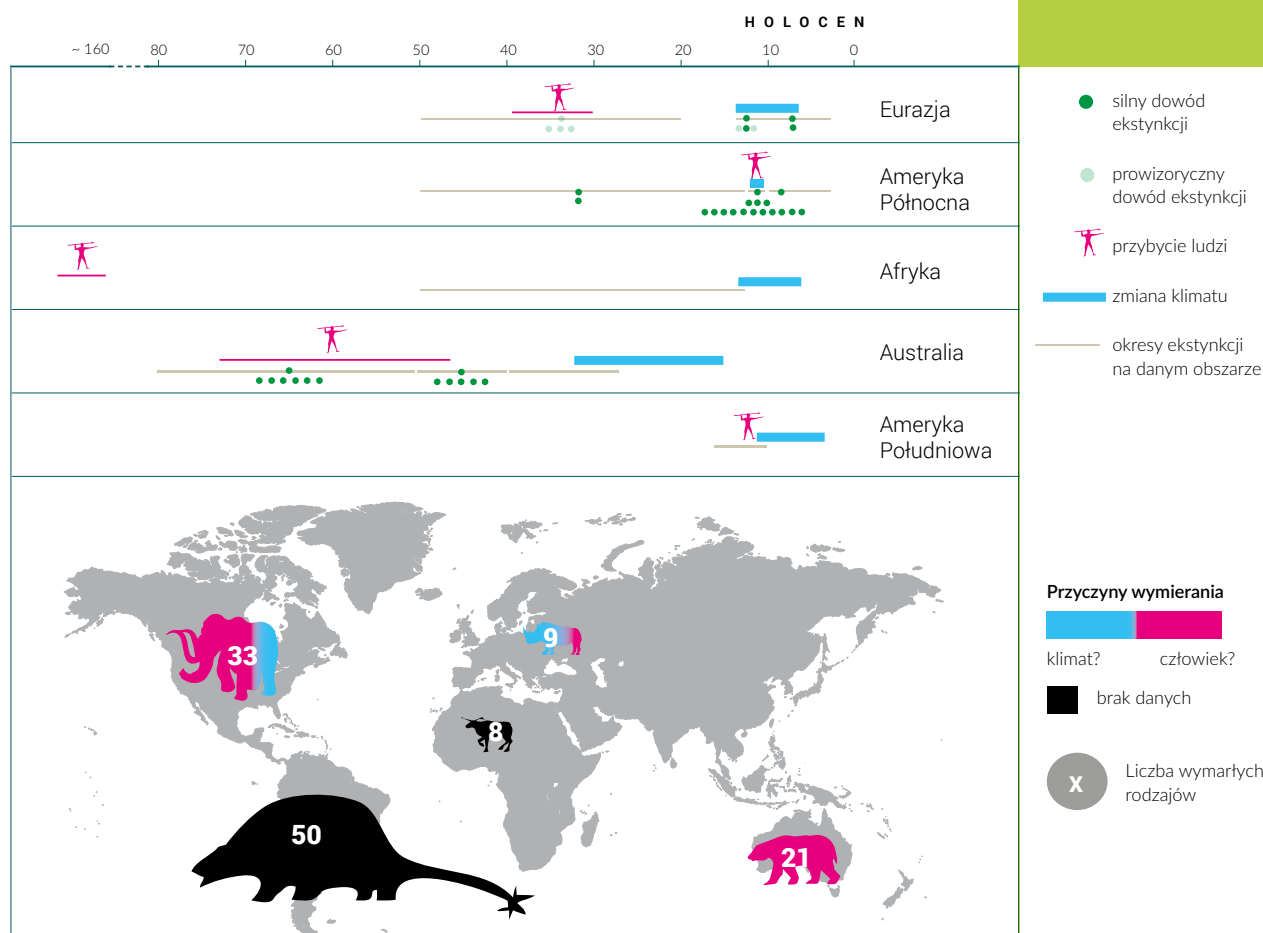
Na podstawie: Perino i in. 2019, *Rewilding complex ecosystems*, „Science” 364: 351

Wpływ człowieka na różnorodność biologiczną

Od początku swojej ekspansji człowiek na różne sposoby prowadzi do zubożenia bioróżnorodności. Nawet gdy lokalnie różnorodność rośnie, zwykle okazuje się, że przybywa gatunków pospolitych, te rzadkie zaś ustępują.

RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA ZANIKA AKTUALNIE GŁÓWNIIE WSKUTEK DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA

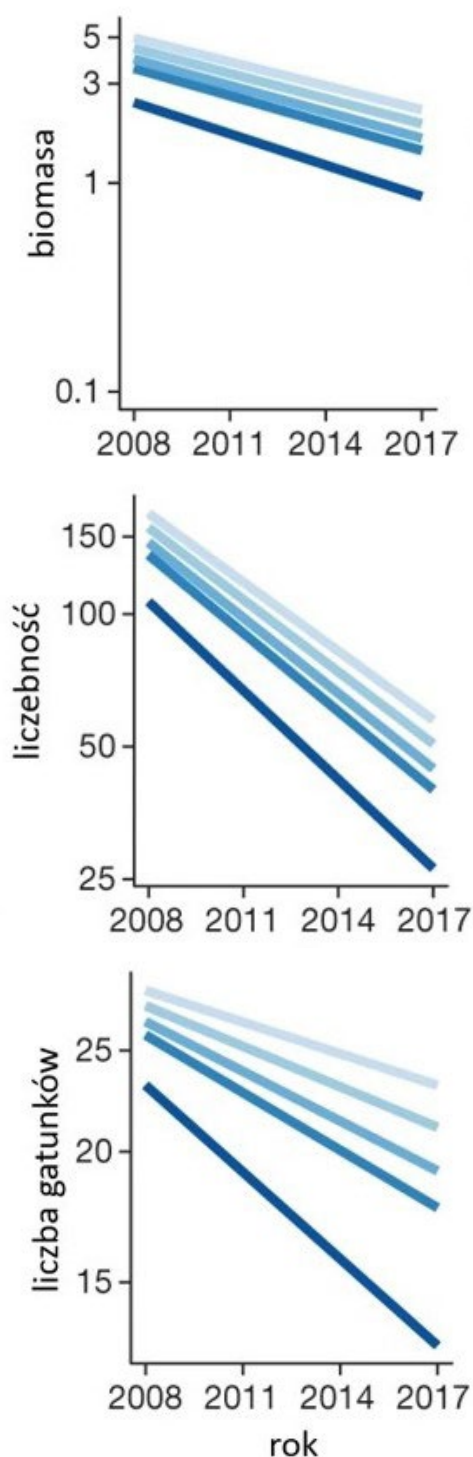
Współczesne wymieranie gatunków rozpoczęło się na długo przed aktualnymi zmianami klimatu. Człowiek zmniejsza bioróżnorodność wokół od samego początku swojej ekspansji. W wielu miejscach, do których dotarł *Homo sapiens*, w miarę jak zasiedlał kolejne fragmenty Ziemi, znikły inne gatunki człowieka i zanikała lokalna, unikalna fauna. Początkowo było to spowodowane efektywnym łowiectwem (w ten sposób zniknęły prawdopodobnie wielkie ssaki i ptaki, tzw. megafauna).



Rysunek 4: Liczba wymarłych rodzajów wielkich ssaków na każdym kontynencie.

Na podstawie: Barnosky in. 2004. *Assessing the causes of late Pleistocene extinctions on the continents.* „Science” 306: 70-75.

Potem istotnym elementem powodującym ekstynkcję gatunków było niszczenie przez człowieka naturalnych siedlisk, począwszy od wypalania lasów w celu pozyskania terenów na uprawy, po rabunkową eksploatację zasobów ekosystemów i wielkoobszarowe skażenia środowiska (np. tlenkami siarki i azotu, co powoduje występowanie kwaśnych deszczy na ogromnych obszarach). Zmiana klimatu w większości przypadków nasila efekt innych degradujących przyrodę działań człowieka, w niektórych przyczynia się do degradacji i utraty bioróżnorodności samodzielnie (patrz: część 2. tej lekcji). Zanik raf koralowych czy lasów namorzynowych pociąga za sobą spadek różnorodności organizmów wodnych, porównywalny na lądzie jedynie z tym spowodowanym dewastacją lasów tropikalnych.



Rysunek 5: Wpływ krajobrazu na zanik stawonogów na użytkach zielonych. Zmiany biomasy, liczebności i liczby gatunków w badanym okresie dla wszystkich stawonogów łącznie.

Badanie zostało przeprowadzone w ramach projektu Biodiversity Exploratories w trzech regionach: południowo-zachodnich, środkowych i północno-wschodnich Niemczech.

Na podstawie: Seibold i in., 2019. *Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers*. „Nature” 574: 671–674.

Udział pól uprawnych w krajobrazie wokół (w promieniu 1 km):

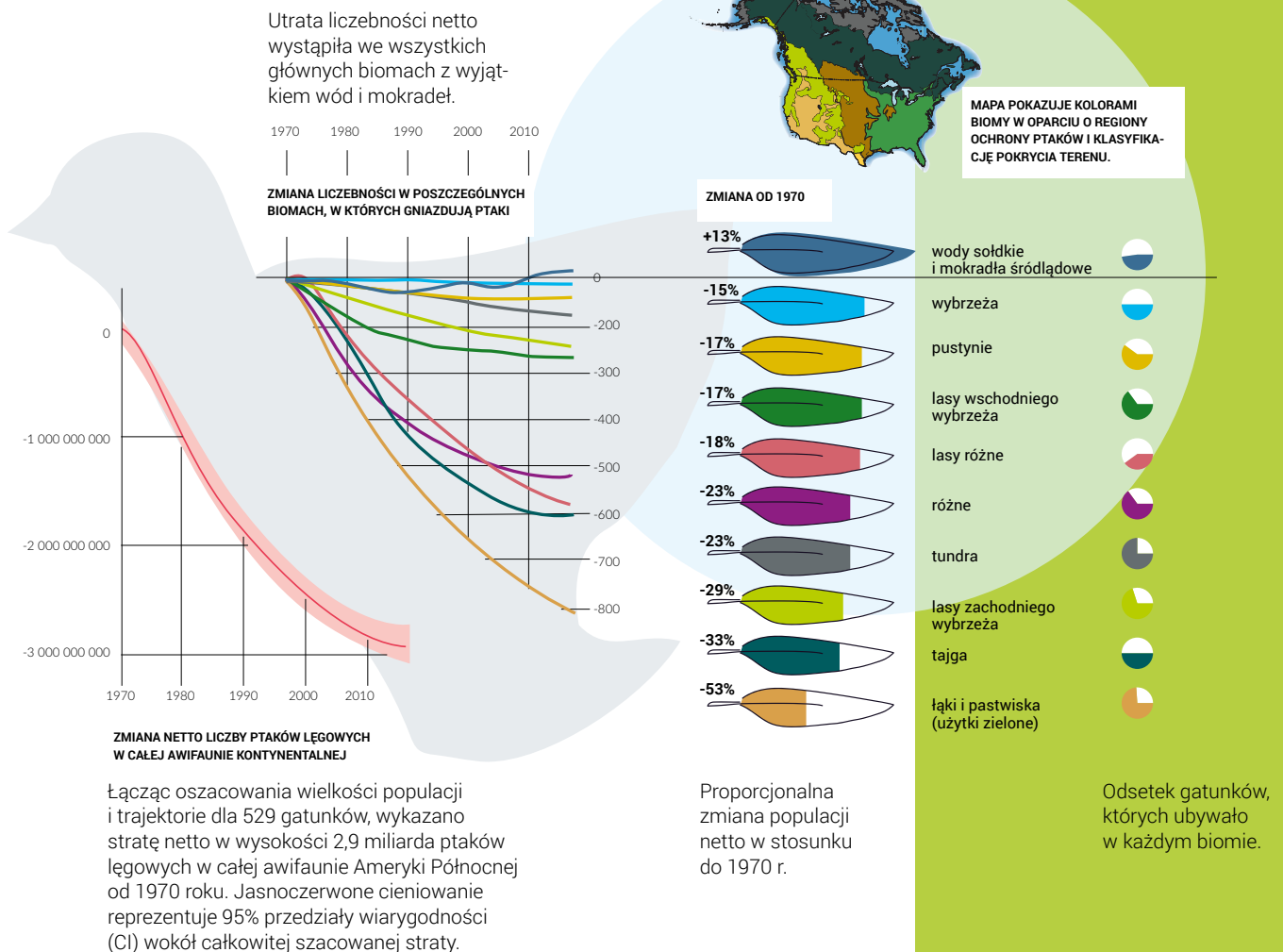
- najmniej
- średnio
- najwięcej

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 Według szacunków każdego dnia w wyniku wycinki wilgotnych lasów równikowych bezpowrotnie giną dziesiątki niepoznanych dotąd przez człowieka gatunków.



Photo by Stephen Radford on Unsplash



Rysunek 6: Zmiana netto liczebności populacji ptaków północnoamerykańskich.

Źródło: Rosenberg i in., 2019. *Decline of the North American avifauna*. „Science” 366: 120–124.

RÓŻNORODNOŚĆ GLOBALNA A RÓŻNORODNOŚĆ LOKALNA

Nie zawsze antropogeniczne zmiany siedlisk prowadzą do zmniejszenia lokalnej bioróżnorodności. Często w wyniku działalności człowieka powstają nowe, często bogate gatunkowo biocenozy, np. parki i ogrody, zastępujące naturalne biocenozy. Znikają jednak przy okazji populacje gatunków wymagających specyficznych, naturalnych siedlisk, przestrzeni zaś zwykle zasiedlają gatunki pospolite, dobrze czujące się w przekształconym przez człowieka środowisku, np. gołąb skalny, szczur wędrowny, pokrzywa zwyczajna czy perz właściwy. Powoduje to szybką globalną ekstynkcję rzadkich gatunków pomimo obserwowanych lokalnie pozorów wzrostu różnorodności. Paradoksalnie więc **traktowanie współczynników lokalnej bioróżnorodności jako miary dobrostanu ekosystemów może powodować niepowetowane szkody w rzeczywistej bioróżnorodności globalnej**. Może też stanowić pretekst do bezpowrotnego niszczenia rzadkich i bardzo cennych przyrodniczo ekosystemów, których immanentną cechą jest niska bioróżnorodność, takich jak górskie szczyty i jeziora czy ekosystemy pustynne (patrz: też materiał dodatkowy „o Giewoncie” oraz film z części 2. tej lekcji).



Przeczytaj artykuł:

Globalne zmiany w świecie zwierząt »

Wywiad z naukowcami:

Ich zanikanie budzi we mnie grozę i przygnębienie »

Efekty bezpośrednie i sprzężenia zwrotne

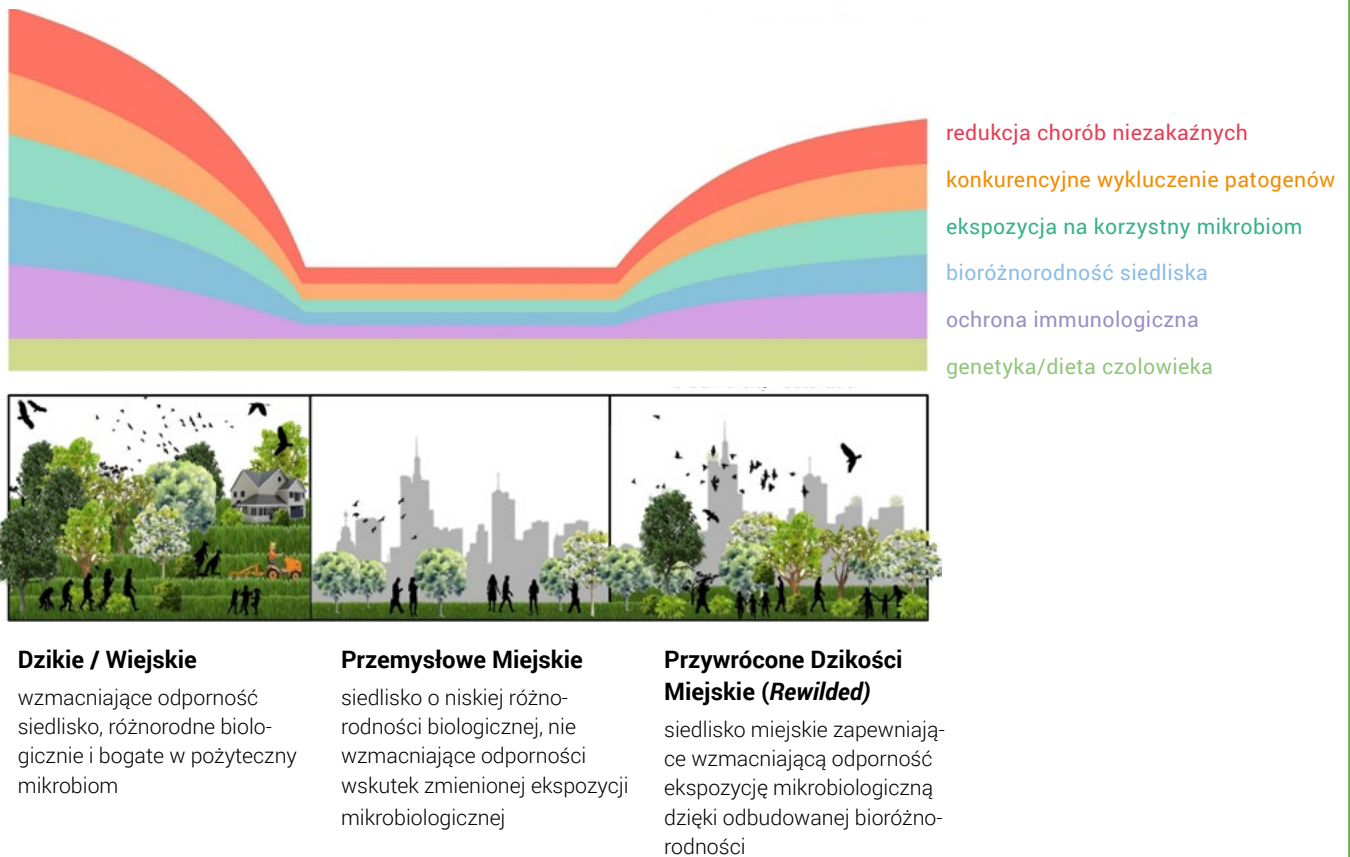
Nasza cywilizacja jest uzależniona od procesów zachodzących w ekosystemach naturalnych. Zaburzenia biosfery bezpośrednio skutkują stratami gospodarczymi, wpływają też na klimat.

BIORÓŻNORODNOŚĆ JEST KLUCZOWA DLA FUNKCJONOWANIA CZŁOWIEKA I JEGO GOSPODARKI

Cywilizacja ludzka od swojego zarania jest uzależniona od elementów dostarczanych przez procesy zachodzące w naturalnych ekosystemach. Nadal nie jesteśmy w stanie bez wielu z nich funkcjonować efektywnie, choćby dlatego, że gwarantują przebieg niezbędnych do życia na Ziemi cykli: hydrologicznego, węgla, azotu czy fosforu. Potrzebujemy tlenu, stałych dostaw świeżej wody, usuwania z przestrzeni, w której żyjemy, dwutlenku węgla i wielu szkodliwych dla nas zanieczyszczeń oraz czynników fizycznych, na przykład promieniowania ultrafioletowego, zatrzymywanego przez stratosferyczny ozon. Nie jesteśmy w stanie przetrwać bez roślinności produkującej tlen, retencjonującej wodę w krajobrazie, oczyszczającej i nawilżającej miejskie powietrze, rozbudowanych sieci pokarmowych (patrz: biocenoza w części 3. tej lekcji) ograniczających zagęszczenie szkodzących nam pasożytów i szkodników upraw, wreszcie, wbrew intuicji wielu nam współczesnych, potrzebujemy naturalnej przyrody dla zdrowia i komfortu życia.

USŁUGI EKOSYSTEMOWE (*ecosystem services*) – wymierne korzyści, jakie ludzie mogą swobodnie czerpać z naturalnego środowiska i prawidłowo funkcjonujących ekosystemów. Są to zarówno dobra konsumpcyjne, takie jak pokarm czy czysta woda, jak i rzeczywiste usługi, takie jak oczyszczanie wody i powietrza, dostarczanie tlenu, zapylanie upraw czy poprawianie samopoczucia i stanu zdrowia.

DEFINICJA
USŁUGI
EKOSYSTEMOWE



Hipoteza rewitalizacji (*rewilding*) mikrobiomu proponuje przywrócenie do siedliska człowieka wysokiej różnorodności mikrobiologicznej i dzikich symbiotycznych, konkurencyjnych i drapieżniczych zależności mikro-ekologicznych. Siedliska człowieka mają zróżnicowany poziom

różnorodności biologicznej i ekspozycji na mikroflorę, ochrony immunologicznej, procesów mikrobiologicznych i zapadalności na choroby zakaźne, także przy niezmięnionej genetyce i diecie ludzi.

Rysunek 7: Mało znaną usługą ekosystemową związaną z różnorodnością biologiczną jest korzyść dla zdrowia ludzkiego zapewniana przez symbiotyczną mikroflorę z naszego środowiska.

Źródło: Mills i in., 2019. *Relating Urban Biodiversity to Human Health With the 'Holobiont' Concept*. *Front. Microbiol.* 10: 550.

Znaczenie przyrody dla człowieka najłatwiej wycenić, patrząc na straty, jakie ponosi gospodarka z powodu antropogenicznych przekształceń ekosystemów (także tych powodowanych pośrednio zmianami klimatycznymi). Koszty takich przekształceń są często oczywiste. Dla przykładu, niszczenie lasów namorzynowych likwiduje unikalną barierę ochraniającą brzeg i ludzkie siedziby przed ekspansją morza podczas burz i huraganów. Ma to szczególne znaczenie wobec nasilenia się gwałtownych zjawisk atmosferycznych spowodowanych zmianami klimatycznymi.

Wiele właśnie zanikających, bogatych przyrodniczo ekosystemów stanowiło podstawę funkcjonowania lokalnych społeczności i źródło licznych usług ekosystemowych dla społeczności zewnętrznych. Dla przykładu, gospodarcze straty spowodowane obumarciem samych raf koralowych zostały wycenione na co najmniej 1 bilion USD.

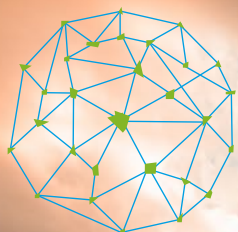


Pasy kwietne
i ochrona roślin »

KAŻDA ZMIANA W EKOSYSTEMIE W MNIJSZYM LUB WIĘKSZYM STOPNIU WPŁYWA NA SYSTEM KLIMATYCZNY

Globalny ekosystem to skomplikowana sieć złożonych zależności pomiędzy ożywionymi i nieożywionymi elementami przyrody. Każda ingerencja w jego elementy rodzi wiele trudno przewidywalnych skutków, także tych dotyczących systemu klimatycznego. Spowodowane przez zmiany klimatu susze przyspieszają erozję i jałowienie gleb oraz degradację torfowisk. Powoduje to nie tylko zwiększenie zasięgu suszy (sprzężenie zwrotne), ale także uwalnianie dużych ilości dwutlenku węgla, co przyspiesza ocieplanie się klimatu (kolejne sprzężenie zwrotne).

Stopień skomplikowania ekosystemu powoduje, że często trudno dostrzec wpływ ingerencji w ekosystem na klimat. Dla przykładu, czy przełowienie ryb może prowadzić do ocieplenia? Przypomnij sobie zamieszczoną w 3. części lekcji graficzną opowieść o wydrach morskich (str. 11»). W ostatnich latach poszerzyła się ona o kolejnych aktorów i kolejne fakty. Dzięki trwającym wiele lat wysiłkom gatunek ten powrócił na wybrzeża Pacyfiku i podwodne lasy zaczęły się odradzać. Wkrótce jednak liczebność wydr znów zaczęła gwałtownie spadać. Okazało się, że zaczęły polować na nie orki zmuszone do zmiany diety na skutek zniknięcia swoich tradycyjnych ofiar: lwów morskich i fok. Za ograniczenie liczebności tych ostatnich odpowiada najprawdopodobniej przełowienie populacji ryb północnego Pacyfiku, stanowiących ich z kolei pokarm. Tak więc przełowienie ryb na Pacyfiku może doprowadzić do ponownego ustępowania podwodnych lasów wodorostowych, czyli zaprzestania wiązania przez nie dwutlenku węgla. Jak podają ostatnie badania, tworzony w oparciu o nie ekosystem może wiązać rocznie od 13 do 43 milionów ton dwutlenku węgla. Przemysłowe połowy ryb mogą więc mieć przełożenie na globalne ocieplenie większe niż to wynikające bezpośrednio z uwalniania dwutlenku węgla zdeponowanego w biomasie znikających w zastraszającym tempie ławic.



KLIMATYCZNE ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ
WIKTOR KOTOWSKI

Połączenia. Jak zmiany w biosferze wpływają na klimat?

Z lekcji 2 i 3 wiesz, że w systemie klimatycznym, obok wymuszeń, znaczącą rolę odgrywają **sprzężenia zwrotne**, czyli takie reakcje systemu ziemskiego na zmianę klimatu, które ograniczają ją (ujemne sprzężenia) lub potęgują (sprzężenia dodatnie). Jak pamiętasz, część dodatnich sprzężeń zwrotnych w systemie klimatycznych Ziemi ujawnia się lub intensyfikuje, gdy zaburzenia (na przykład spowodowane przez człowieka) doprowadzą do przekroczenia określonych punktów krytycznych. Z kolei ostatnie lekcje mówiły o tym, jak wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze i będące jego efektem ocieplenie klimatu wpływają na przyrodę nieożywioną (lekcja 9) i ożywioną (lekcja 10). W tej lekcji chcemy połączyć te informacje. Podsumujemy rodzaje klimatycznych sprzężeń zwrotnych i opiszemy nieco szerzej te, które dotyczą bezpośrednio **cyklu węglowego** (a więc wpływają na zawartość dwutlenku węgla i metanu w atmosferze) i mogą być zmieniane przez naszą ingerencję w ekosystemy Ziemi. Zwrócimy uwagę, jak **zmiany w biosferze**, o których pisaliśmy w lekcji 10, **wpływają na klimat**. Są to zarówno wymuszenia, a więc efekty naszych bezpośrednich ingerencji w systemy przyrodnicze, jak i sprzężenia, czyli zwrotne reakcje biosfery na klimat w odpowiedzi na zmianę klimatu. Opiszemy szerzej interakcję klimatu z ekosystemami lądowymi, w których nasza działalność może zarówno pogłębiać, jak i ograniczać globalne ocieplenie.

Dodatkowo, chcąc pokazać szerszy obraz wpływu człowieka na biosferę, omówimy koncepcję **granic planetarnych**, zwracając uwagę, że zmiana klimatu jest jednym z kilku globalnych problemów wywołanych przez człowieka, w dodatku według oceny naukowców wcale nie najbardziej zaawansowanym. Co więcej, pomiędzy różnymi przejawami antropopresji istnieją powiązania przyczynowo-skutkowe z reguły wzmacniające destabilizację biosfery i naszej cywilizacji. Ale pokazujemy też najważniejsze miejsca, gdzie konieczna i wciąż możliwa jest **„naprawa” zaburzonych systemów przyrodniczych**. Zapamiętaj te kwestie – wrócimy do nich w ostatniej lekcji na temat działań adaptacyjnych i ograniczających zmianę klimatu.

Klimatyczne sprzężenia zwrotne – czy mamy na nie wpływ?

Sprzężenia zwrotne to ważny element systemu klimatycznego. Niektóre sprzężenia są całkowicie poza naszym zasięgiem, podczas gdy inne możemy wzmacniać lub osłabiać poprzez naszą działalność – zarówno w skali globalnej, jak i regionalnej.



Photo by Yann Allegre on Unsplash

Klimatyczne sprzężenia zwrotne dotyczą zarówno zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze, a w szczególności dwutlenku węgla (nazywane sprzężeniami cyklu węglowego), jak i bezpośrednio wzrostu temperatury (np. poprzez zmiany albedo czy krążenia wody). Sprzężenia różnią się też tempem reakcji: niektóre działają w długich oknach czasowych – setek lub tysięcy lat, a inne w skali dni, tygodni czy lat. Wpływ człowieka na klimat to nie tylko wymuszenia radiacyjne polegające na emisjach gazów cieplarnianych, ale także wzmacnianie lub osłabianie klimatycznych sprzężeń zwrotnych. Poniżej wymieniamy najważniejsze klimatyczne sprzężenia i wskazujemy, czy i jak nasze działania mogą je modyfikować.

SPRZĘŻENIA:



DODATNIE



UJEMNE

1. SPRĘŻENIA NIE ZWIĄZANE Z CYKLEM WĘGLOWYM

Czy i jak wpływamy
na wielkość sprzężenia?



1.1 Sprężenia związane z chmurami

W związku z podwyższonym parowaniem ocieplenie klimatu wpływa na tworzenie się, rozmieszczenie i charakterystykę chmur. Chmury z jednej strony pochłaniają promieniowanie podczerwone, co sprzyja ocieplaniu się klimatu (sprężenie dodatnie), a z drugiej – odbijają światło słoneczne, co sprzyja jego ochładzaniu (sprężenie ujemne). To, który efekt przeważa, zależy od rodzaju chmury. Obserwacje i obliczenia wskazują, że globalnie rzecz biorąc zmiany w zachmurzeniu zapewniają dodatnie sprzężenie zwrotne dla globalnego ocieplenia (Norris i in., 2016). Sprężenia związane z chmurami mają różne tempo, ale w większości zaliczane są do kategorii sprzężeń szybkich. Dodatkowo, niedawne badania wskazują, że postępujący wzrost temperatury może spowodować zanik stratocumulusów nad oceanem, wywołując potężne dodatnie sprzężenie zwrotne, skutkujące wzrostem temperatury o kilka stopni Celsjusza (Schneider i in., 2019).

Czynnikiem wpływającym na tworzenie i utrzymywanie się chmur jest występowanie aerozolu atmosferycznego pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Wpływanie na właściwości chmur morskich jest jednym z proponowanych geoinżynierskich działań ograniczających zmianę klimatu.



Więcej na ten temat
przeczytasz w tekście

Geoinżynieria, czyli jak
naprawić klimat »



1.2 Sprężenie pary wodnej (dodatnie)

Wzrost temperatury wywołuje większe parowanie, a ogrzewająca się atmosfera zatrzymuje coraz więcej pary wodnej, która jest silnym gazem cieplarnianym. Jest to jedno z najszybciej działających dodatnich sprzężeń zwrotnych.

Choć zmieniając pokrycie lądów roślinnością, wpływamy na parowanie z nich, nie ma to wpływu na ilość pary wodnej w globalnej atmosferze, ponieważ głównym elementem tego sprzężenia jest parowanie z oceanów, na które nie mamy wpływu.



1.3 Uwalnianie innych substancji

Wzrost temperatury oraz zmiana funkcjonowania ekosystemów mogą wpływać na uwalnianie z biosfery takich gazów jak tlenek azotu(I) z rozkładu torfu i topniejącej wiecznej zmarzliny (dodatnie sprzężenie zwrotne) czy siarczek dimetylu z oceanów (ujemne sprzężenie zwrotne). Należy do stosunkowo wolnych sprzężeń klimatycznych.

Osuszanie torfowisk i nawożenie zwiększa emisje tlenku azotu(I).



+

1.4. Topnienie lodu morskiego, lodowców i zmiana albedo (dodatnie)

Topniejący lód odsłania otwartą wodę lub ląd, które odbijają mniej światła słonecznego. Zwiększone pochłanianie promieniowania słonecznego skutkuje wyższą temperaturą, generując dalsze topnienie lodu. Tempo procesów odpowiedzialnych za to sprzężenie jest stosunkowo szybkie w przypadku lodu morskiego, natomiast znacznie wolniejsze w przypadku lądolodów.

Osiadanie na lodzie sadzy i innych pyłów generowanych w procesach przemysłowych lub pożarach zmniejsza albedo i przyspiesza topnienie lodowców.

-

1.5. Wypromieniowywanie podczerwieni w przestrzeń kosmiczną (promieniowanie ciała doskonale czarnego – ujemne)

Im cieplejsza jest atmosfera Ziemi, tym więcej energii „ucieka” w kosmos w postaci promieniowania podczerwonego. Niestety, efekt ochładzający związany z tym sprzężeniem jest znacznie mniejszy niż ocieplenie wywołane coraz silniejszym przechwytywaniem promieniowania podczerwonego w wyniku rosnącej koncentracji gazów cieplarnianych.

Zwiększanie warstwy gazów cieplarnianych powoduje, że mniej ciepła ucieka z Ziemi w kosmos – dlatego m.in. temperatura atmosfery rośnie.

2. SPRĘŻENIA CYKLU WĘGLOWEGO

Czy i jak wpływamy na wielkość sprzężenia?

-

2.1. Wietrzenie skał

Sprężenie zwrotne związane z długim cyklem węglowym, wzrost zawartości CO_2 w atmosferze zwiększa tempo jego usuwania w procesie chemicznego wietrzenia skał, jednak jest to proces powolny, o znaczeniu w geologicznych skalach czasowych.

Sztuczne zwiększanie powierzchni skał narażonych na wietrzenie jest jednym z proponowanych rozwiązań geoinżynierskich ograniczających zmianę klimatu (Beerling i in., 2018).

+

2.2. Zmniejszenie pochłaniania CO_2 przez oceany

Rozpuszczalność gazów w wodzie maleje ze wzrostem temperatury, zatem ogrzewanie wód spowoduje, że coraz mniejsza część dwutlenku węgla emitowanego przez człowieka i uwalnianego w procesach sprzężeń zwrotnych będzie pochłaniana przez oceany; dodatkowym czynnikiem zmniejszającym pochłanianie będzie wzrost stratyfikacji temperaturowej oceanów w wyniku ocieplenia oraz zmiany cyrkulacji termohalinowej.

Poza naszym wpływem.

-

2.3. Wzrost produktywności ekosystemów (efekt nawożenia CO₂ – ujemne)

Podwyższona zawartość CO₂ w powietrzu może w niektórych ekosystemach spowodować szybszy wzrost roślin i zwiększyć ilość węgla związanego w biomase roślinnej. Ten efekt dotyczy jednak tylko tych ekosystemów, gdzie węgiel jest aktualnie pierwiastkiem limitującym wzrost roślin – do takich należą np. mszyste torfowiska. W większości ekosystemów wzrost roślin jest ograniczony dostępnością azotu lub fosforu, ewentualnie wody – w takich sytuacjach wzrost zawartości CO₂ nie spowoduje jego większego pochłaniania. Stosunkowo wolne sprzężenie.

Zastępowanie lasów i mokradeł uprawami rolnymi oraz degradacja ekosystemów lądowych związana z suszami lub zubożeniem gleb zmniejszają znaczenie tego sprzężenia. Z drugiej strony, działalność człowieka znacząco zwiększa dostępność azotanów i fosforanów w środowisku, co lokalnie zwiększa produkcję pierwotną, powodując większą absorpcję CO₂.

Produkcja pierwotna to tempo przyrostu biomasy roślinnej. Zwykle wyrażana w suchej masie roślin lub masie zasymilowanego węgla w przeliczeniu na jednostkę powierzchni na rok.

+

2.4. Przyspieszony rozkład materii organicznej

Wzrost temperatury powoduje przyspieszenie przebiegu procesów biologicznych, w tym aktywności mikroorganizmów przeprowadzających rozkład materii organicznej w ekosystemach. Może to spowodować, że nawet przy podwyższonej produkcji pierwotnej bilans węgla będzie w ekosystemie ujemny i więcej dwutlenku węgla będzie z niego uciekać niż zostanie zasymilowane w procesie fotosyntezy. Sprzężenie z kategorii wolnych.

Antropogenicznie przekształcone (np. rolnicze) ekosystemy z reguły szybciej tracą węgiel w wyniku rozkładu materii organicznej w glebach. Tempo jej rozkładu rośnie też w wyniku osuszania obszarów podmokłych. Ponadto promowane w uprawach leśnych szybko rosnące gatunki drzew mają łatwiej rozkładającą się biomasę niż gatunki wolno rosnące.

+

2.5. Uwalnianie metanu z klatratów

Klatraty to kryształy hydratów metanu występujące w osadach na dnie oceanów. Pod wpływem wzrostu temperatury klatraty mogą uwalniać metan, powodując szybki wzrost efektu cieplarnianego. Sprzężenie prawdopodobnie szybkie po przekroczeniu punktu krytycznego.

Poza naszym wpływem.



By Boris Radosavljevic - <https://www.flickr.com/photos/139918543@N06/24531601650/>, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=80427894>



2.6. Uwalnianie metanu z topniejącej wiecznej zmarzliny

Obszary wiecznej (a właściwie wieloletniej) zmarzliny to w dużej części torfowiska, które były aktywne w cieplejszych okresach. W zamrożonym torfie zachowały się bąbelki metanu, które mogą uwalniać się, gdy marzłoc ustąpi (czytaj więcej w sekcji o torfowiskach). Sprężenie wolne.

Wydobycie gazu i ropy naftowej w Arktyce powoduje erozję torfów pokrywających zmarzlinę i przyspiesza jej topnienie.



2.7. Rozkład torfu

W podwyższonej temperaturze część torfowisk może wyschnąć, co doprowadzi do rozkładu torfu i emisji znacznych ilości dwutlenku węgla. Sprężenie o skali czasowej dziesiątek lat, o rząd wielkości szybsze niż ujemne sprężenie związane z akumulacją torfu.

Osuszanie torfowisk na cele rolnicze i leśne zmienia je z pochłaniaczy w znaczące źródła dwutlenku węgla.

Więcej w sekcji o torfowiskach w tej lekcji, na stronie 197.



2.8. Akumulacja nowych pokładów torfu

Wzrost temperatury i zawartości dwutlenku węgla w atmosferze może zwiększyć tempo akumulacji torfu tam, gdzie utrzyma się wysokie uwodnienie. Bagna mogą też rozprzestrzeniać się na nowe obszary. Jest to niestety znacznie wolniejszy proces niż sprężenie dodatnie związane z degradacją torfowisk (czytaj więcej w sekcji o torfowiskach).

Osuszanie mokradeł i zmiany krajobrazu zaburzające bilans wodny (regulacje rzek, wylesienia) wyhamowują procesy torfotwórcze. Z drugiej strony, możemy odtwarzać procesy bagienne ponownie nawadniając osuszone torfowiska oraz inicjować je w nowych miejscach zatrzymując wodę w krajobrazie.



Zobacz przykłady restytucji torfowisk »



2.9. Pożary torfowisk

Na znacznie przesuszonych torfowiskach może dochodzić do pożarów torfu, a w efekcie do gwałtownych emisji dwutlenku węgla. (czytaj więcej w sekcji o torfowiskach).

Jedno z najszybszych sprzężeń cyklu węglowego w obrębie ekosystemów lądowych.

Sprzężenie zwrotne znacząco powiązane z gospodarką człowieka, ponieważ pożary torfu dotyczą prawie wyłącznie torfowisk osuszonych przez człowieka. Możemy je ograniczyć przez restytucję przyrodniczą (ponownie nawadnianie) torfowisk.



2.10. Wysychanie lasów deszczowych

Wzrost parowania spowodowany ociepleniem klimatu wywołuje zamieranie tropikalnych lasów deszczowych stanowiących ogromny rezerwuar węgla organicznego – zarówno w żywej biomase drzew, jak i w glebach. Jednocześnie powstaje powiązane hydrologiczne sprzężenie zwrotne w postaci zmniejszonego lądowego obiegu wody: obumierające lasy przestają retencjonować i przenosić wodę w głąb lądu, co pogłębia suszę i wywołuje dalsze emisje CO₂ w wyniku obumierania roślin. Sprzężenie o średnim czasie reakcji.

Wylesienia powierzchniowe powodują, że pozostałe płaty lasów są mniej odporne na suszę, podobnie wpływają cięcia selektywne (usuwanie dużych drzew).

Czytaj więcej w sekcji o lasach na stronie 196 tej lekcji.



2.11. Pożary lasów

Deficyt wody spowodowany zwiększonym parowaniem oraz wysokie temperatury powodują pożary lasów, które generują szybkie emisje dwutlenku węgla do atmosfery, jak również silne sprzężenie związane z osłabionym lądowym obiegiem wody (czytaj więcej w sekcji o lasach). Dość szybkie sprzężenie w porównaniu z innymi elementami cyklu węglowego.

Zastępowanie lasów wielogatunkowych monokulturami bardzo znacząco zwiększa ich podatność na pożary; gospodarka żarowa (wypalanie lasów, zarośli i łąk) zwiększa prawdopodobieństwo zaprószenia ognia.

Na przełomie 2019 i 2020 roku w Australii wystąpiły pożary lasów i zarośli o niespotykanej dotąd skali. Objęły ponad 100 tysięcy km², powodując emisje co najmniej 306 ton dwutlenku węgla i śmierć setek milionów zwierząt. Choć ogień w australijskim buszu jest zjawiskiem naturalnym, to ogromna skala i intensywność tych pożarów były efektem potężnych susz w 2019 roku i poprzedzających latach oraz ekstremalnie wysokich temperatur.





2.12. Pustynnienie i erozja gleb

Wzrost temperatury i deficyty wody powodują zanik roślinności i rozkład materii organicznej w glebach; w efekcie wzrasta powierzchnia ekstremalnie suchych ekosystemów (pustyń, półpustyń, suchych stepów) o niewielkiej zawartości węgla organicznego (czytaj więcej o glebach). Sprzężenie działa w skali dziesięcioleci.

Pustynnienie jest wzmacniane przez pobór wód gruntowych dla rolnictwa oraz intensywną gospodarkę pasterską.

Czytaj więcej w części o ekosystemach rolniczych na stronie 198 tej lekcji.



Ważne: sprzężenia dodatnie działają zwykle szybciej niż sprzężenia ujemne. Na przykład emisje spowodowane przyspieszonym rozkładem lub pożarami lasów zachodzą znacznie szybciej niż wzrost sekwestracji w wyniku regeneracji lasów, podobnie jest z emisjami z rozkładu torfu, który w wysychających torfowiskach zachodzi co najmniej 10 razy szybciej niż akumulacja torfu w torfowiskach pozostających w stanie bagiennym. Również dodatnie sprzężenia zwrotne związane z przyrodą nieożywioną (np. zmiany albedo i efekt pary wodnej) działają znacznie szybciej niż sprzężenia ujemne (wietrzenie skał). Pokazuje to, że dla ograniczania zmian klimatu najważniejsze, obok zmniejszania emisji, są działania osłabiające sprzężenia dodatnie, np. przez restytucję ekosystemów i transformację rolnictwa.



POŻARY TORFOWISK

Antropogeniczne źródło emisji CO₂ i wzmocnione przez człowieka sprzężenie klimatyczne.

Odwodnione torfowiska płoną od lat na całym świecie, a ostatnio skala i częstotliwość tych pożarów wyraźnie narastają. Pierwotną przyczyną pożarów torfu są prawie zawsze odwodnienia torfowisk związane z rolnictwem lub leśnictwem. W Indonezji ogromne pożary torfowisk pojawiły się zaledwie kilka lat po rozpoczęciu osuszania ogromnych bagien tropikalnych na Borneo i Sumatrze. W 1997 roku ogień strawił miliony hektarów torfowisk, uwalniając do atmosfery od 0.8 do 2.5 GT węgla, co odpowiadało 13–40% całkowitych emisji antropogenicznych (Page, 2002). Podobne pożary pojawiały się potem w kolejnych latach (2006, 2009, 2013, 2014, 2015) w Indonezji i Malezji, ogarniając coraz to nowe obszary torfowisk, wraz z intensyfikacją ich osuszania na potrzeby plantacji palmy olejowej. W reakcji na zanieczyszczenie smogiem i zagrożenie życia i zdrowia ludzi wywołane pożarami Indonezja rozpoczęła w 2016 roku program restytucji bagien obejmujący dwa miliony hektarów. Podobnie w Rosji ogromne pożary torfowisk w 2010 roku, które na wiele tygodni spowiły Moskwę w gęstym dymie, były powodem decyzji o rozpoczęciu programu ich ponownego nawadniania.

Susze i wysokie temperatury zwiększają ryzyko zapalenia się torfu, powodują też wysychanie roślinności, po której szybko rozchodzi się ogień, stwarzając niebezpieczeństwo przedostania się w głąb torfu. W Polsce w kwietniu 2020 roku potężny pożar objął ponad 5500 ha torfowisk w Biebrzańskim Parku Narodowym. Wywołał on straty w lęgach ptaków i zmiany w siedliskach przyrodniczych, ale na szczęście udało się uniknąć wglębnego pożaru torfu – był to pożar powierzchniowy, który objął tylko suchą roślinność. Jednak ryzyko było duże, ponieważ torfowiska w środkowej części parku są odwodnione od ponad 200 lat. Długotrwałe pożary torfu miały tu już miejsce kilkakrotnie w ciągu ostatnich 20 lat. By uchronić się przed nimi, potrzebne byłoby zatamowanie wszystkich występujących tu rowów i kanałów odwadniających i dzięki temu przywrócić warunki bagienne.

Torf pali się bezpłomieniowo, tłąc się przez wiele tygodni i generując ogromne ilości dymu.

Płonące torfowisko na Borneo w Królestwie Brunei (zdz. W. Kotowski).



O programie nawadniania torfowisk w Rosji »



Czytaj więcej o pożarach torfowisk »

W jaki sposób ekosystemy magazynują węgiel?

Większość węgla krążącego w szybkim obiegu pochodzi z ekosystemów lądowych oraz powierzchniowych wód oceanów. Człowiek ma niewielki wpływ na wymianę węgla między atmosferą i oceanem, natomiast gospodarka ekosystemami lądowymi może znacząco wpłynąć na emisję lub pochłanianie węgla z atmosfery.

ZNACZENIE EKOSYSTEMÓW DLA WYMIANY I MAGAZYNOWANIA WĘGLA

Jak pamiętasz z lekcji 3, zdecydowana większość węgla na Ziemi znajduje się w litosferze i głębinach oceanicznych. Ten węgiel bardzo powoli wymienia się z węglem w atmosferze – obieg ten stanowi część wolnego cyklu. Natomiast rezerwuary węgla organicznego, zawarte w ekosystemach lądowych, słodkowodnych oraz w powierzchniowych warstwach mórz i oceanów, należą do tzw. szybkiego cyklu węglowego, który z naszej ludzkiej perspektywy ma znacznie większe znaczenie. Węgiel w ekosystemach występuje zarówno w postaci nieorganicznej – np. w postaci osadowych skał węglanowych, rozpuszczonego dwutlenku węgla i jonów wodorowęglanowych czy wytrąceń węglanu wapnia w glebach, jak i w postaci organicznej – czyli w związkach chemicznych wytworzonych przez organizmy żywe. Węgiel wchodzący w skład związków organicznych jest zawarty w żywych organizmach oraz w tzw. martwej materii organicznej – glebach, osadach i substancjach rozpuszczonych w wodach.

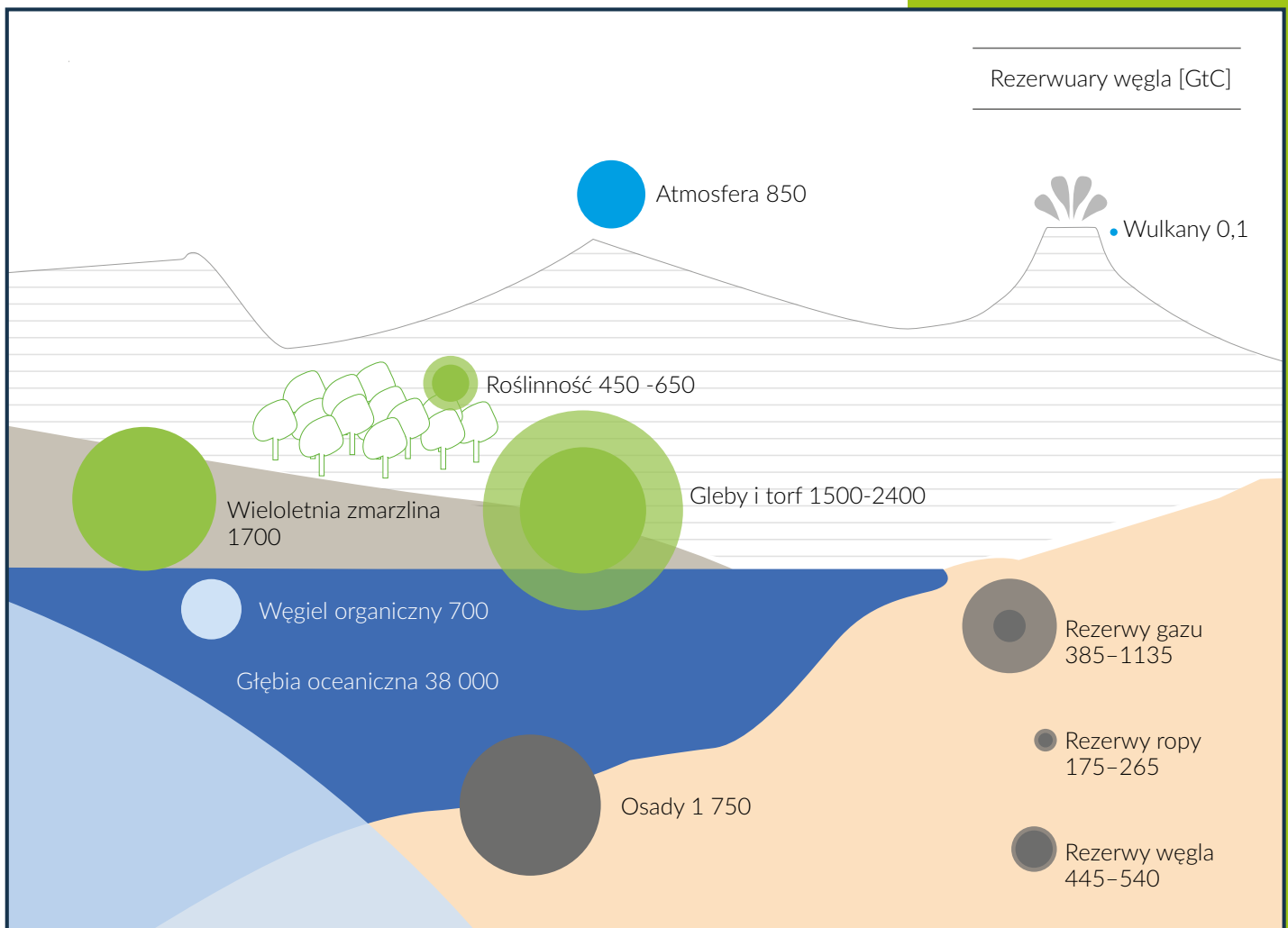
Proporcje pomiędzy węglem nieorganicznym i organicznym są bardzo odmienne w oceanach i ekosystemach lądowych. Jak widzisz na rysunku 1, w oceanach prawie cały węgiel występuje w formie nieorganicznej – to rozpuszczony w wodzie dwutlenek węgla i jony wodorowęglanowe, zawierające łącznie ok. 38 tysięcy GT węgla (z czego ok. 900 GT w powierzchniowych warstwach wód), następna w kolejności jest pula węgla w postaci rozpuszczonych w wodzie związków organicznych (700 GT), a przy tych wielkościach węgiel organiczny zawarty w żywych organizmach stanowi niemal pomijalną ilość kilku gigaton.



Oznacza to, że część szybkiego cyklu węglowego związana z oceanami opiera się w głównej mierze na procesach fizyko-chemicznych, czyli rozpuszczaniu i dysocjacji CO_2 w wodzie oraz zmianach tej rozpuszczalności związanych z temperaturą. Nie mamy na nie wpływu.

CZY WIESZ, ŻE ?

👉 Czas pozostawiania węgla organicznego w ekosystemach lądowych może być bardzo różny. Zależy on od typu ekosystemu, szerokości geograficznej (a więc... klimatu) oraz naszego gospodarowania systemami lądowymi (o tym więcej w lekcji 13). Na przykład czas wymiany węgla (*turnover rate*) w lasach tropikalnych wynosi kilkanaście lat, w lasach strefy umiarkowanej 20–30 lat, a w lasach borealnych i tundrze – kilkadziesiąt. Szczególnymi ekosystemami, które potrafią „uwięzić” węgiel organiczny na tysiące lat, znacznie przekraczając granice szybkiego cyklu węglowego, są bagna oraz ekosystemy z wieczną (wieloletnią) zmarzliną.



Rysunek 1: Najważniejsze globalne magazyny węgla. Na zielono zaznaczono zasoby węgla w ekosystemach lądowych, na które możemy wpływać poprzez zarządzanie gospodarką lądami.

Opracowane na podstawie: Friedlingstein i in., 2019.

Na lądach sytuacja jest odmienna. Pula węgla uczestnicząca w szybkim obiegu to przede wszystkim węgiel organiczny. W biomase organizmów jest go ok. 500 GT, czyli o dwa rzędy wielkości więcej niż w organizmach morskich! Niemal cały węgiel organiczny zawarty w żywej biomase lądowej jest w roślinach (zwierzęta, grzyby i bakterie to mniej niż 10%). Z obumarłych roślin powstaje materia organiczna w glebach, zawierająca w skali globalnej między 1500 a 2400 GT węgla. To ogromna pula, która w zależności od funkcjonowania ekosystemów może wzrastać lub maleć (wskutek rozkładu i erozji) – tym samym zmniejszając lub zwiększając ilość dwutlenku węgla w atmosferze. **Zarówno pula węgla w biomase roślinnej, jak i pula glebowa pełnią ważną rolę w obiegu węgla między biosferą i atmosferą, są więc ważnymi elementami klimatycznych sprzężeń zwrotnych, na które mamy znaczący wpływ.** Na razie nasza aktywność nasila zmianę klimatu, ale przez mądre działania adaptacyjno-mitygacyjne możemy ten trend odwrócić.

CZY WIESZ, ŻE ?

 Przed rewolucją rolniczą biosfera lądowa zawierała najprawdopodobniej około dwukrotnie większą pulę węgla niż obecnie. Zmniejszenie tej puli wiąże się ze zniszczeniem naturalnych ekosystemów, w szczególności lasów i zastąpieniem ich znacznie mniej produktywnymi systemami rolniczymi. Drugim ważnym czynnikiem jest wywołana przez rolnictwo erozja i wyjałowienie gleb, które spowodowało zmniejszenie produktywności ekosystemów. W związku z tym procesem maleje również pula węgla glebowego, a węgiel zawarty niegdyś w roślinach i glebach zasilił pulę atmosferyczną, a następnie w większości rozpuścił się w oceanie.

Klimat a ekosystemy lądowe

Gospodarowanie lądami przez człowieka coraz bardziej zmniejsza możliwości pochłaniania węgla przez ekosystemy. Działania adaptacyjne i ograniczające zmianę klimatu mogą ten trend odwrócić.



ZMIANA KLIMATU A LĄD – RAPORT SPECJALNY IPCC Z 2019 ROKU

Jak wiesz z poprzednich podrozdziałów, nasza działalność na lądach może znacząco wpływać na klimat. Lądy to nasze miejsce zamieszkania, podstawowe miejsce produkcji żywności, zdobywania zasobów odnawialnych i nieodnawialnych oraz źródło wody pitnej. Eksploatując te zasoby od czasów neolitycznej rewolucji rolniczej po czasy współczesne, znacząco zmieniliśmy ekosystemy lądowe, wpływając również na ich interakcję z systemem klimatycznym Ziemi. Ale lądy stwarzają też szansę dla ograniczenia zmiany klimatu i adaptacji do niej – np. poprzez zalesienia, restytucję ekosystemów czy reformę systemu rolnego. Z tych powodów państwa-strony Konwencji Klimatycznej w czasie konferencji w Paryżu w 2015 r. zwróciły się do Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu (IPCC) o przygotowanie specjalnego raportu, który miał przeanalizować interakcje między klimatem a procesami zachodzącymi w ekosystemach lądowych – pustynnieniem, degradacją ekosystemów, wylesieniem – ale również wskazać możliwości i potencjał adaptacji i mitygacji. Raport „Klimat a lądy – specjalne sprawozdanie IPCC w sprawie zmian klimatu, pustynnienia, degradacji gleby, zrównoważonej gospodarki gruntami, bezpieczeństwa żywnościowego i przepływów gazów cieplarnianych w ekosystemach lądowych” został opublikowany w 2019 roku. Poniżej zamieszczamy jego najważniejsze wnioski – zwłaszcza w zakresie opisu interakcji między ekosystemami lądowymi a zmianą klimatu. Do rekomendacji IPCC w zakresie adaptacji i ograniczania zmiany klimatu zawartych w tym raporcie wrócimy w 13 lekcji.

Dziś człowiek użytkuje bezpośrednio ponad 70% niepokrytej lodem powierzchni lądów – są w tym pola uprawne (12%), łąki i pastwiska (37%) oraz lasy wykorzystywane przede wszystkim do pozyskania drewna (22%). Tylko 16% zajmują ekosystemy pozbawione znaczącego wpływu człowieka (z czego lasy to 9%). Pozostałe 12% to tereny pozbawione roślinności (pustynie, skały).

Od okresu przedprzemysłowego temperatura nad lądami wzrosła niemal dwa razy bardziej niż średnia globalna temperatura, wywołując m.in. pustoszczenie i degradację gleb i poważnie zmniejszając bezpieczeństwo żywnościowe.

Rolnictwo, leśnictwo i inne rodzaje użytkowania gruntów odpowiadają dziś za 23% całkowitych antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, w tym 13% dwutlenku węgla, 44% metanu oraz 81% tlenu azotu(I).

Z drugiej strony, badania wskazują, że ekosystemy lądowe zwiększyły pochłanianie dwutlenku w odpowiedzi na antropogeniczny wzrost koncentracji tego gazu w atmosferze (efekt „nawożenia” CO_2), połączone ze zwiększeniem ilości azotanów w środowisku. Dzięki temu zaabsorbowały prawdopodobnie 29% naszych całkowitych emisji w latach 2007–2016. Niestety, modele wskazują, że zdolność ekosystemów lądowych do absorbowania CO_2 będzie maleć wraz z dalszym ociepleniem klimatu.

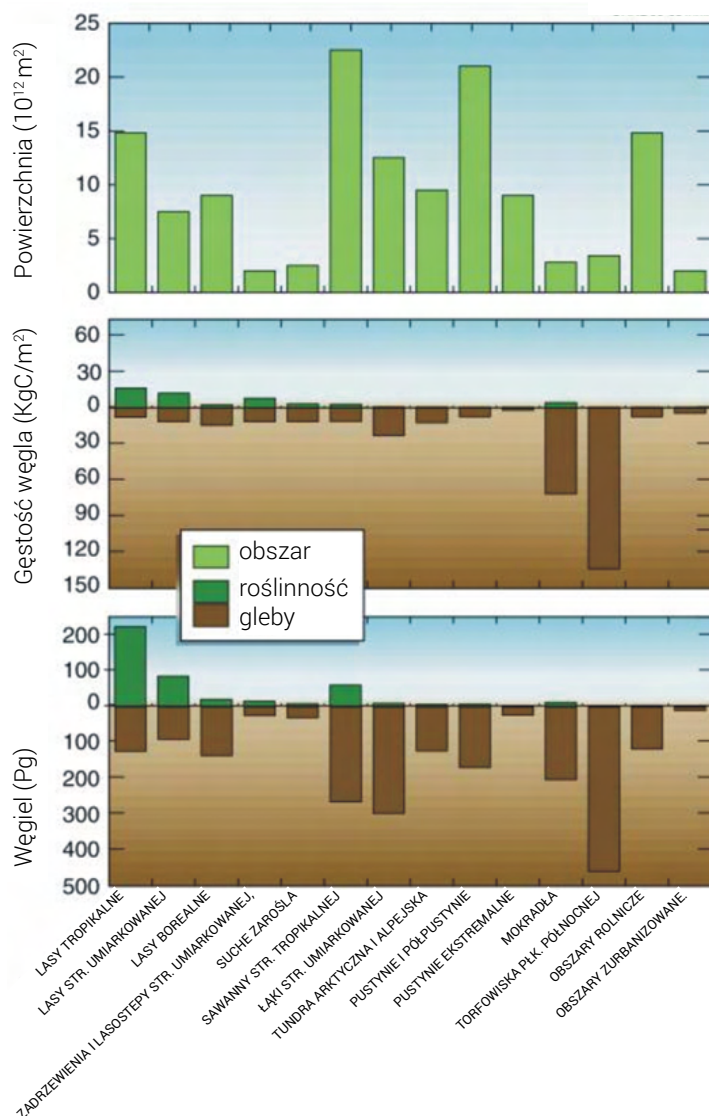
Wpływ zmian w ekosystemach lądowych na zmianę klimatu jest wieloaspektowy i uwzględnia efekty globalne i lokalne. Do efektów globalnych należą przede wszystkim przepływy (emisje i absorpcje) gazów cieplarnianych oraz zmiana albedo związana ze zmianą pokrycia powierzchni lądów roślinnością. Lasy pochłaniają więcej promieniowania słonecznego niż obszary otwarte, w tym rolnicze, zatem wylesianie ma jednocześnie wpływ ogrzewający (wskutek emisji CO_2) oraz oziębiający (wskutek rosnącego albedo). Badania wskazują, że od epoki przedprzemysłowej do dziś wpływy te znacząco się znosiły i efekt netto jest niewielki. Jednak w przewidywanym przyszłym wpływie deforestacji i degradacji ekosystemów efekt ogrzewający przeważa. Do efektów regionalnych należy przede wszystkim zmiana ewapotranspiracji (parowania terenowego) – jej wzrost wywołuje lokalne schładzanie, a spadek – ogrzewanie.

Ograniczenie zmiany klimatu i adaptacja do niej w oparciu o zarządzanie ekosystemami lądowymi przynosi wiele dodatkowych korzyści, takich jak zapobieganie pustoszczeniu i degradacji gleb, poprawa bezpieczeństwa żywnościowego i ochrona różnorodności biologicznej. Większość z nich sprzyja realizacji celów zrównoważonego rozwoju. Najważniejsze to: zalesienia i modyfikacja gospodarki leśnej, zmiana systemów rolniczych na rolnictwo regeneracyjne (zwiększające zawartość węgla w glebach), odtwarzanie naturalnych ekosystemów – w szczególności bagien i mokradeł nadmorskich.

ROLA GŁÓWNYCH TYPÓW EKOSYSTEMÓW LĄDOWYCH W MAGAZYNOWANIU I PRZEPŁYWACH WĘGLA

MAGAZYNOWANIE

By ocenić rolę poszczególnych typów ekosystemów jako magazynów węgla, trzeba wziąć pod uwagę, ile węgla akumulują w przeliczeniu na jednostkę powierzchni oraz powierzchnię zajmowaną przez nie globalnie (rysunek 2). Co ciekawe, jeśli wziąć pod uwagę węgiel zawarty w żywej biomasie, jak i węgiel glebowy, to okaże się, że największymi globalnymi magazynami węgla organicznego nie są wcale, jak się powszechnie sądzi, lasy, ale bagna, które na 3% powierzchni lądów zakumulowały w torfie od 0,5 do 1 GT węgla.



Rysunek 2: Powierzchnia, gęstość węgla w przeliczeniu na powierzchnię oraz całkowita pula węgla zawarta w biomasie i glebach głównych ekosystemów świata. Za: Parish i in., 2008. Uwaga: w niedawnej publikacji Nichols i in. (2019) podali nawet dwukrotnie wyższą zawartość węgla w północnych torfowiskach. Ponieważ trwa w literaturze dyskusja co do poprawności metodyki tych badań lepiej jest przyjmować dość duży zakres niepewności, co do torfowiskowej puli węgla (0,5–1 teratona), co nie zmienia faktu, iż jest to najefektywniejszy magazyn węgla w lądowej biosferze.

Źródło: Joosten, H. & Couwenberg, J. 2008. Peatlands and Carbon. W: Parish, F. i in., Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International Wageningen, s. 99-117

PRZEPŁYWY

Jak możesz pamiętać z lekcji 3, ekosystemy absorbują dwutlenek węgla z atmosfery w procesie fotosyntezy, w którym rośliny i inne samożywne organizmy (np. glony, cyjanobakterie) zamieniają zawarty w nim węgiel na cukry i inne związki organiczne, z których są zbudowane. Z kolei oddychanie komórkowe, polegające na odzyskiwaniu energii zawartej w związkach organicznych na potrzeby procesów życiowych, produkuje dwutlenek węgla. W efekcie oddychania roślin, zwierząt i mikroorganizmów węgiel powraca do atmosfery w postaci dwutlenku węgla i częściowo w postaci metanu, który powstaje w wyniku oddychania beztlenowego (np. w mokradłach).

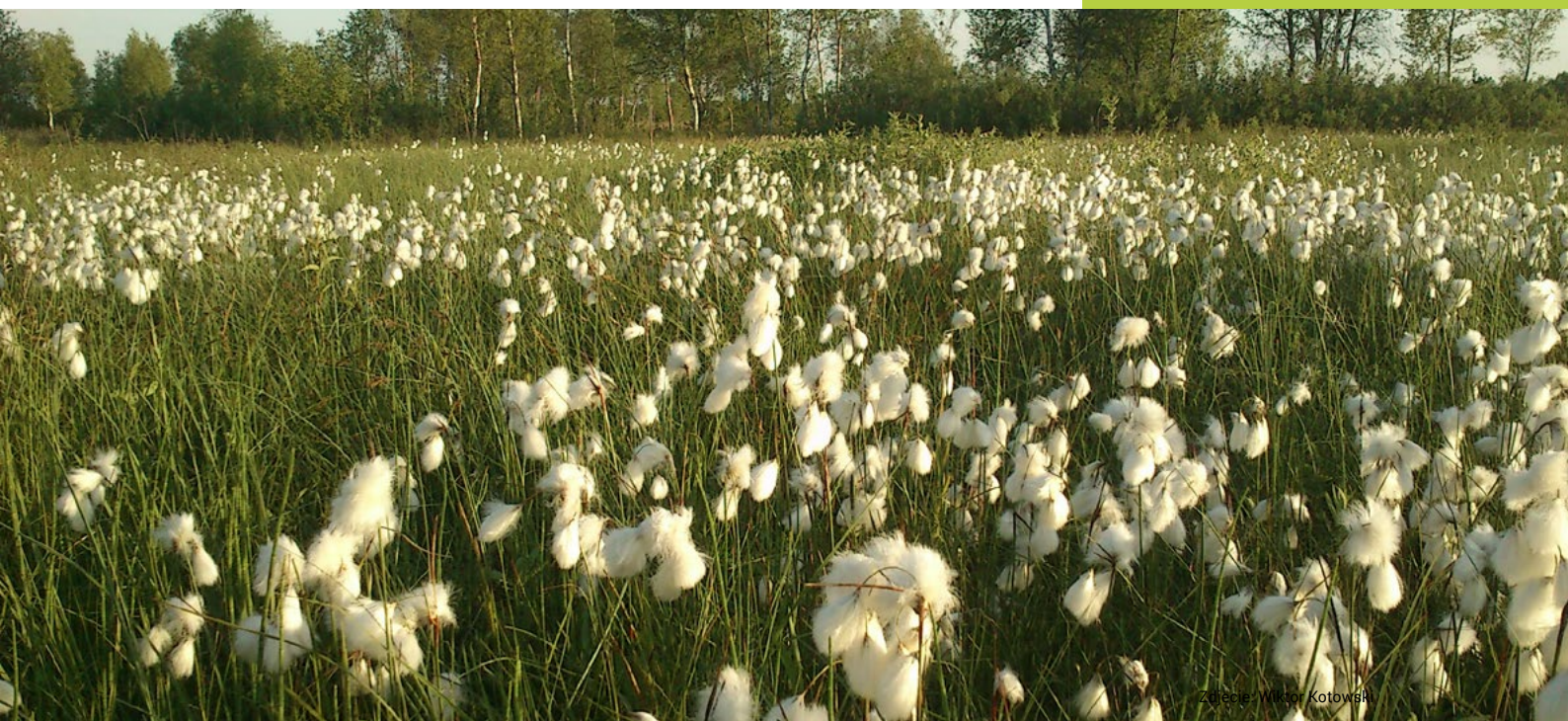
Stabilny ekosystem pozostaje w stanie względnej równowagi między pochłanianiem i uwalnianiem CO_2 , choć w długiej perspektywie pochłanianie nieco przeważa, ponieważ część węgla zostaje „pogrzebana” w osadach morskich lub bagiennych i nie wraca do atmosfery. Ale ekosystemy nie zawsze są w stanie równowagi, a w odpowiedzi na działania człowieka zwykle są z tej równowagi wytrącane. Co więcej, zmieniający się klimat może wpływać zarówno na tempo pochłaniania CO_2 (a więc tempo wzrostu roślin), jak i na jego uwalnianie (np. poprzez regulowanie tempa rozkładu materii organicznej). W efekcie bilans wymiany węgla między ekosystemem i atmosferą może być wyraźnie ujemny lub dodatni. **Ekosystemy o bilansie dodatnim, które akumulują węgiel, nazywa się z angielska *carbon sinks*, co tłumaczy się na j. polski jako „pochłaniacze węgla”. Jeśli ekosystemy tracą więcej węgla niż asymilują, określa się je jako „źródła” (*carbon sources*).** W wyniku działań człowieka wiele ekosystemów, które funkcjonowały jako pochłaniacze, zmienia się w źródła emisji, uruchamiając kolejne dodatnie klimatyczne sprzężenia zwrotne. Poniżej przyjrzymy się trzem typom ekosystemów lądowych, które pełnią najważniejszą rolę w klimatycznych sprzężeniach zwrotnych, i na których w związku z tym powinny się skupić nasze działania ograniczające zmianę klimatu.

LASY

Lasy zajmują około 30% powierzchni lądów, przy czym ponad 2/3 z nich jest użytkowanych gospodarczo. Las gromadzi węgiel w biomasie roślin, w szczególności w drzewach, a także w glebie. Dojrzały las naturalny w stanie równowagi pełni przede wszystkim rolę magazynu węgla, choć w warunkach zwiększonej koncentracji CO_2 może w niektórych warunkach zacząć czasowo działać jako pochłaniacz węgla. Deforestacja, a także selektywna wycinka drzew, z reguły zmienia lasy w źródła CO_2 dla atmosfery. Z kolei regeneracja lasów na terenie wylesionym powoduje, że teren staje się pochłaniaczem. Aby jednak pełnił tę funkcję skutecznie, pochłanianie węgla powinno wiązać się z jego trwałym magazynowaniem. Dlatego trudno uznać tworzenie lasów gospodarczych za skuteczną formę ograniczania zmiany klimatu. Gromadzący się w pniach drzew węgiel jest bowiem cyklicznie usuwany i powraca do atmosfery w wyniku rozkładu. Czas, jaki minie, zanim ten węgiel dostanie się do atmosfery, zależy od tego, na jakie produkty zostanie przeznaczone drewno: średnio kilkadziesiąt lat przetrwają bale drewniane w budownictwie, deski kilkanaście, a papier kilka lat. Najszybciej wróci do atmosfery węgiel z drewna wykorzystanego na opał – podobnie stanie się, gdy las strawi pożar. W lesie gospodarczym mamy często do czynienia ze zubożeniem glebowej puli węgla,

która w mniejszym stopniu niż w lesie naturalnym jest zasilana rozkładającym się drewnem. Współczesne leśnictwo wzmacnia też często erozję gleb w związku z używaniem ciężkiego sprzętu i budową sieci dróg do wywozu drewna. Oczywiście nie oznacza to, że powinniśmy całkowicie zaniechać komercyjnego leśnictwa – rzecz jednak w tym, że nie możemy traktować upraw drzew jako efektywnych pochłaniaczy węgla. Konieczne jest natomiast zwiększenie powierzchni lasów naturalnych, których główną rolą będzie magazynowanie węgla, jednocześnie służąc ochronie przyrody.

Zalesianie może być przeprowadzane przez sadzenie młodych drzew, ale może też zachodzić na drodze naturalnej sukcesji – np. w wyniku zaprzestania intensywnego wypasu bydła. W niedawnej pracy (Bastin i in., 2019) przeprowadzono optymistyczne oszacowanie, że w skali świata dostępnych do zalesienia jest nawet 1 miliard hektarów gruntów, a rozwój lasów na nich do czasu osiągnięcia przez nie dojrzałości (ok. 100–200 lat) pozwoliłby zakumulować ponad 200 GT węgla, czyli pięciokrotność naszych rocznych emisji (rzeczywisty wpływ na koncentrację dwutlenku węgla w atmosferze byłby jednak mniejszy, ponieważ pochłanianie jest kompensowane przez uwalnianie z oceanów). Pamiętajmy też, że wzrost zalesienia spowodowałby jednocześnie zmniejszenie albedo, a więc efekt klimatyczny netto byłby mniejszy niż wynikający tylko z akumulacji dwutlenku węgla. Z drugiej strony, zalesienia zwiększają retencję wody i wzmacniają jej lokalny obieg, co wywołuje lokalnie efekt ochłodzenia.



Zdjęcie: Wiktor Kotowski

TORFOWISKA I BAGNA

Bagna to, w pewnym uproszczeniu, ekosystemy aktywnie akumulujące torf, czyli „żywe” torfowiska. Torf jest skałą osadową powstającą z martwych szczątków roślin. Dzięki nasyceniu podłoża wodą, która ogranicza dostęp tlenu, rozkład materii organicznej jest ograniczony, w związku z czym część zasymilowanego przez rośliny węgla jest unieruchamiana w torfie. Akumulacja torfu jest jednym z najefektywniejszych mechanizmów pochłaniania węgla w biosfe-

rze lądowej. Wprawdzie zachodzi ona powoli – pokład torfu przyrasta w tempie ok. 1–2 mm na rok, co przekłada się na akumulację kilku ton CO₂ na hektar na rok, a w skali globalnej ok. 400 milionów ton (ok. 1% naszych antropogenicznych emisji) – ale za to jest to magazynowanie trwałe, w sprzyjających warunkach na tysiące, a nawet miliony lat (pokłady węgla brunatnego i kamiennego powstały wszak z torfu na prehistorycznych bagnach).

Z naszej perspektywy czasowej od aktualnego pochłaniania węgla przez torfowiska znacznie ważniejsza jest ich rola jako magazynów węgla. Zajmując zaledwie 3% powierzchni lądów, zgromadziły one w torfie od 500 do 1000 Gt węgla, co przekracza przynajmniej dwukrotnie ilość węgla w biomasie światowych lasów. Jeśli nie zachowamy bagien w stanie naturalnym, ten węgiel może w przyspieszonym tempie wrócić do atmosfery, potęgując globalne ocieplenie. Torfowiska osuszone i przekształcone w pastwiska, uprawy rolnicze lub leśne przestają być bagnami i zmieniają się z pochłaniaczy w źródła dwutlenku węgla. Odwodniony torf zaczyna się rozkładać w wyniku działania mikroorganizmów, tak jak każda materia organiczna w niebagiennym ekosystemie lądowym. Rozkładowi torfu towarzyszą emisje od kilku do nawet kilkuset ton dwutlenku węgla z hektara rocznie, przekraczając nawet kilkadziesiąt razy tempo akumulacji CO₂ w bagnach. W skali świata odwodniliśmy 15–20% bagien, z których rocznie ulatuje do atmosfery około 2 GT dwutlenku węgla, co odpowiada ok. 5% antropogenicznych emisji. Szczególnie gwałtowne emisje towarzyszą pożarom torfu, które występują na silnie odwodnionych torfowiskach.

Receptą na emisje dwutlenku węgla z odwodnionych torfowisk jest ich ponowne zabagnienie poprzez zablokowanie rowów i kanałów odwadniających. Warto podkreślić, że oprócz ograniczenia emisji CO₂ odtwarzanie bagien jest jednym z najważniejszych sposobów retencji wody i lokalnego schładzania klimatu poprzez zwiększanie ewapotranspiracji. Więcej o tym piszemy w lekcji 13. Na razie jednak bagna należą do najszybciej ginących ekosystemów i wciąż nowe tereny są osuszane, co potęguje efekt cieplarniany. Dodatkowo do degradacji bagien przyczynia się wydobycie torfu, wykorzystywanego przede wszystkim jako podłoże w ogrodnictwie przemysłowym.

EKOSYSTEMY ROLNICZE

Obszary rolnicze zajmują połowę pozbawionej lodu powierzchni świata. Zamiana naturalnych ekosystemów w systemy rolnicze spowodowała ucieczkę ogromnych ilości węgla organicznego z biosfery do atmosfery. Co więcej, aktualnie dominujący sposób gospodarki rolnej pogłębia ten problem wskutek degradacji gleb, obejmującej przyspieszony rozkład i erozję materii organicznej. Szacuje się, że procesy degradacji gleb, skutkujące utratą węgla organicznego, zachodzą na ¼ powierzchni lądów pozbawionej lodu, a tempo erozji gleb na obszarach rolniczych jest od 10 do 100 razy większe niż tempo ich formowania (IPCC, 2019). Do tego dokładają się znaczące emisje z samej produkcji, wynikające z wykorzystania nawozów (w tym emisje tlenu azotu(I)), produkcji metanu w przewodach pokarmowych krów i innych przeżuwaczy, emisji metanu z pól ryżowych, a także emisje związane ze zużyciem energii w zmechanizowanej produkcji rolnej.

CZY WIESZ, ŻE ?

 Czy wiesz że: rola bagien w przepływach gazów cieplarnianych, oprócz pochłaniania dwutlenku węgla, obejmuje też emisje metanu, który powstaje w wyniku beztlenowego rozkładu materii organicznej. Ilość emitowanego metanu jest stosunkowo mała w porównaniu do absorbowanego dwutlenku węgla, ale jak wiesz z lekcji 4, każda jego tona dodana do atmosfery ma większy wkład w ocieplenie niż tona CO₂. Ponieważ jednak metan stosunkowo szybko jest utleniany w atmosferze do CO₂, jego potencjalny wpływ na efekt cieplarniany maleje z czasem. Dlatego, jeśli rozpatrujemy wpływ bagien w krótkim (np. dziennym) oknie czasowym, to jest on ocieplający, ale w kilkudziesięcioletnim okresie okazują się neutralne klimatycznie lub lekko ochładzające, ponieważ efekt usuwania węgla z atmosfery przeważa nad emisją stosunkowo niewielkich ilości metanu. A jeśli weźmiemy pod uwagę setki lub tysiące lat, bagna okażą się bardzo efektywnymi „schładzaczami” atmosfery, zmniejszającymi efekt cieplarniany.



Więcej o związkach bagien z klimatem

Czytaj »

Oglądaj »

Bezpośrednie emisje z rolnictwa, uwzględniające też jego ekspansję na nowe tereny (w tym deforestację) to 16–27% całkowitych antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych. Dodatkowe 5–10% emisji to związane z rolnictwem i produkcją żywności emisje „poza farmą” – czyli powstające podczas produkcji energii wykorzystywanej w rolnictwie, transporcie i przetwórstwie żywności. Rolnictwo jest też głównym „użytkownikiem” słodkiej wody, a jej pobór na nawodnienie upraw dokłada się do zmiany klimatu jako przyczyna pustynnienia i susz.

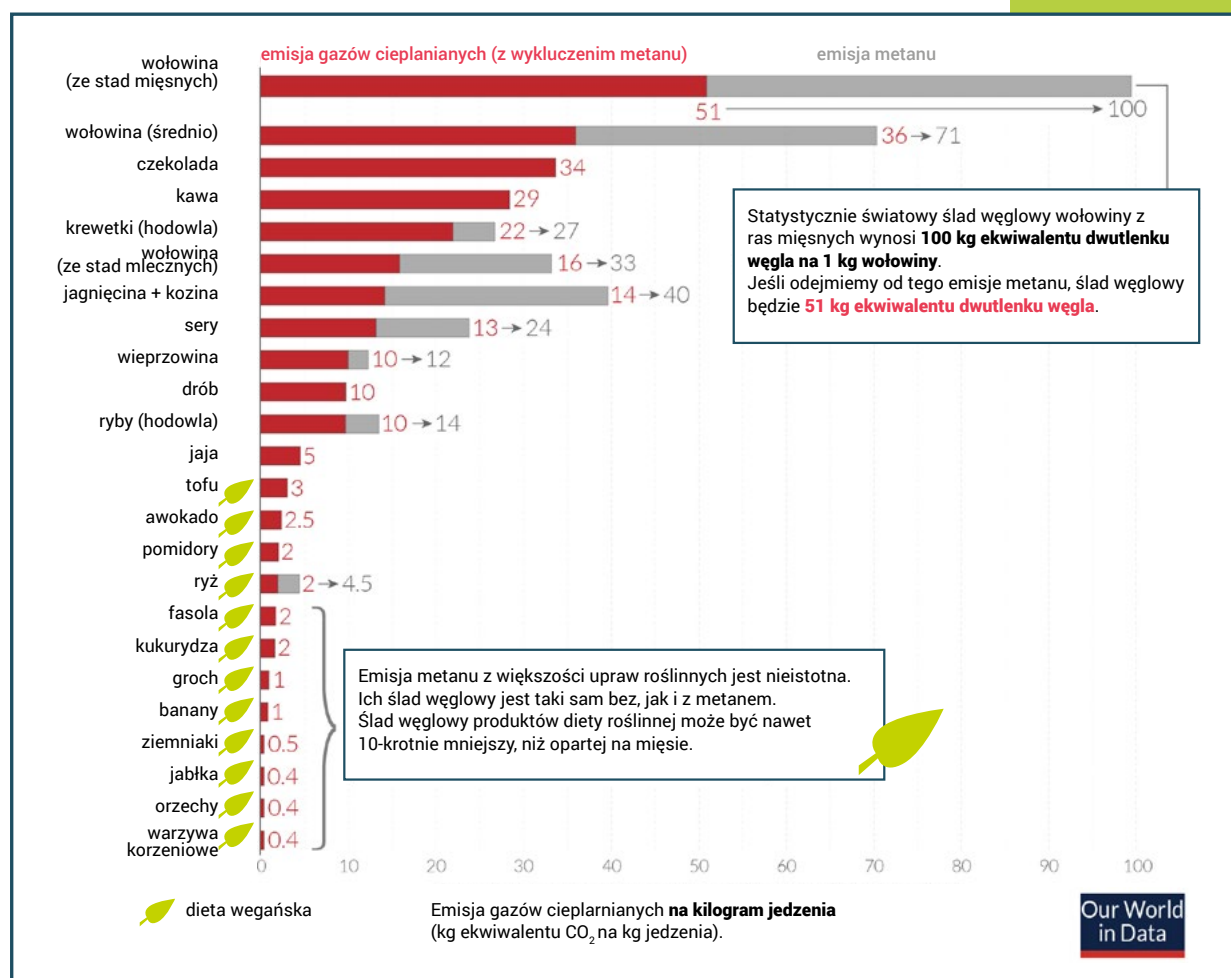
Do kluczowych działań ograniczających emisje dwutlenku węgla z sektora rolnego należy zmiana technik uprawy na takie, które ograniczają utratę węgla i przywracają jego pochłanianie przez gleby (dowiesz się o nich w ostatniej lekcji) oraz zmniejszanie zużycia wody.

Drugim niezmiernie ważnym kierunkiem jest zmniejszanie ilości mięsa i produktów zwierzęcych w diecie. Jak możesz zobaczyć na rysunku 3 i 4, produkcja mięsa generuje wielokrotnie większe emisje CO₂ niż produkcja jadalnych roślin – również tych o wysokiej zawartości białka (rysunek 4). Jak widać na wykresach, wysoki ślad węglowy wołowiny i przetworów mlecznych w połowie wynika z emisji metanu, ale w równym stopniu jest związany z emisjami dwutlenku węgla w wyniku wylesień i degradacji gruntów.



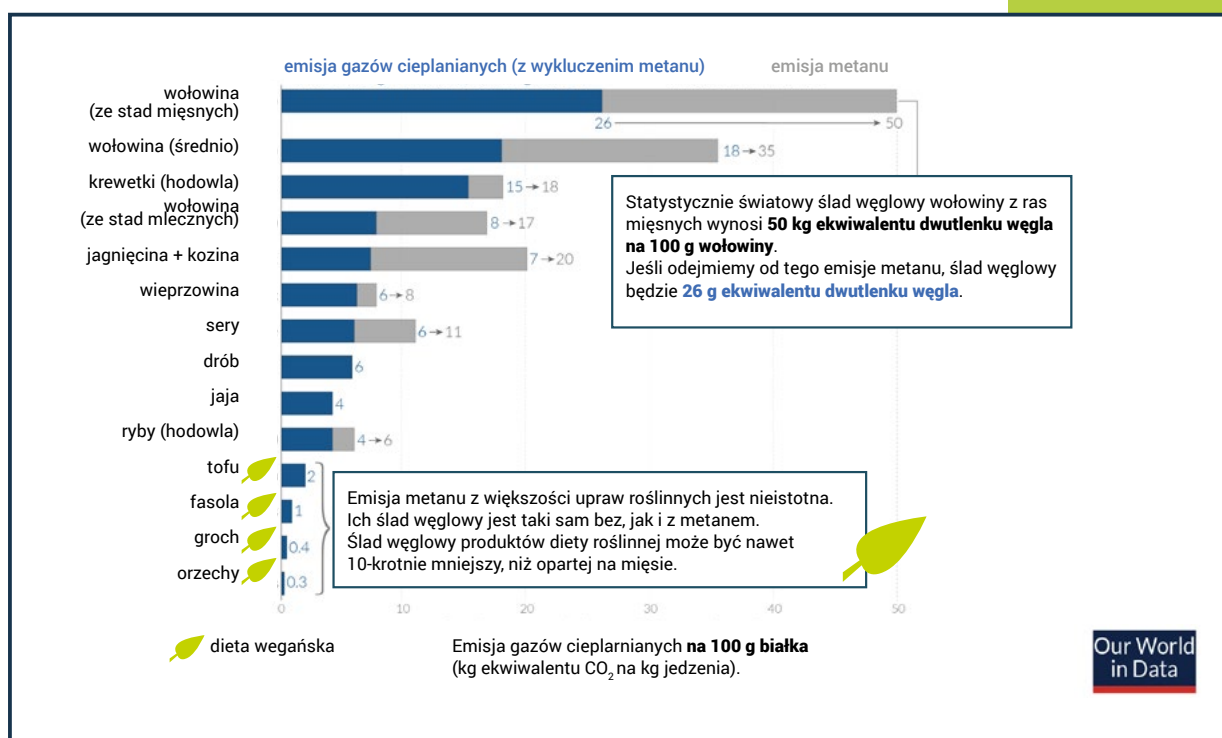
Czytaj więcej o wpływie diety na emisje dwutlenku węgla:

Klimatyczny ślad kotleta »



Rysunek 3: Emisje gazów cieplarnianych z różnych rodzajów żywności w przeliczeniu na 1 kg.

Źródło: <https://ourworldindata.org/carbon-footprint-food-methane>



Rysunek 4: Emisje gazów cieplarnianych z żywności wysokobiałkowej w przeliczeniu na 100 g białka.

Źródło: <https://ourworldindata.org/carbon-footprint-food-methane>



Nie tylko zmiana klimatu. Granice planetarne, czyli jaka jest odporność biosfery na działania człowieka?

Zmiana klimatu to niejedyne znaczące przekształcenie środowiska wywołane działalnością człowieka. Co więcej, zdaniem części naukowców wcale nie jest to najbardziej palący (nomen omen) problem, który musimy rozwiązać w skali planetarnej. Oprócz tego trzeba pamiętać, że różne zmiany w biosferze wzajemnie na siebie oddziałują i często wzmacniają. Na przykład cieplejsze wody szybciej reagują zakwitami glonów na przeżyźnienie (eutrofizację) spowodowaną dopływem azotanów i fosforanów z pól uprawnych niż wody zimne. Wylesienia spowodowane ekspansją rolnictwa bezpośrednio wpływają na wymieranie gatunków, ale też generują emisje CO₂, zwiększając efekt cieplarniany. Osłabiają one także krążenie wody na lądach, potęgując susze wywołane ociepleniem klimatu. To tylko przykłady powiązań, które musimy zrozumieć, by przewidzieć, w jakim kierunku może zmienić się świat wskutek działalności człowieka.

Kiedy pytamy o przyszłość, najważniejszą kwestią zapewne pozostaje to, jak przyroda i nasza cywilizacja odpowie na te zmiany. Czy w biosferze istnieją mechanizmy samoregulacji, pozwalające jej dostosować się do zmieniającego się świata, zachowując podstawowe procesy ekologiczne? Czy w antroposferze, gospodarce i kulturze istnieje potencjał do adaptacji do czekających nas zmian w przyrodzie? Te pytania to w rzeczywistości pytania o odporność systemu na presję ze strony człowieka. Tak jak nadmuchiwany balon ma swoją wytrzymałość i nie może rozciągać się bez końca, tak systemy przyrodniczy i społeczny mają określoną odporność, której przekroczenie może spowodować zasadniczą zmianę w funkcjonowaniu świata. Balon po przekroczeniu odporności gumy na rozciąganie nie znika, ale zmienia się w taki sposób, że nie może już pełnić w żaden sposób dotychczasowych funkcji. Czy tak samo może stać się z naszym światem?

Analogię z balonem możemy rozbudować. Czy znacie prosty eksperyment z balonem i sokiem z pomarańczy? Gdy nadmuchany balon skropimy pomarańczowym sokiem, ten zareaguje z gumą i spowoduje, że balon pęknie. To, ile soku będzie potrzeba albo jakie jest prawdopodobieństwo pęknięcia, zależy oczywiście od tego, jak bardzo balon jest napompowany. Im bardziej, tym cieńsza jest

Antroposfera to ta część środowiska ziemskiego, która została stworzona lub znacząco przekształcona przez człowieka dla własnej działalności i wykorzystywana przez niego jako biotop. Na antroposferę składają się systemy i materiały wytworzone przez człowieka, sama populacja ludzka, a także interakcje tych składowych z naturalnymi systemami Ziemi.

jego powłoka i tym mniej **odporna** staje się na dodatkową presję soku z cytrusa. Tak samo interakcje różnych rodzajów antropopresji zmieniają granice odporności naszego świata. Coraz bardziej przypomina on nadmuchiwany wciąż balon, który z różnych stron nakłuwamy i traktujemy żrącymi substancjami, wierząc, że skoro dotychczas nie pękł, to znaczy, że wszystko przetrzyma.

Pytanie o odporność postawiliśmy w kontekście przyszłości systemu przyrodniczego i społecznego. Ale czy da się je oddzielić? W tym rozdziale argumentujemy, że w naszej epoce, antropocenie, nie da się już traktować tych domen osobno. Pytanie o odporność systemu planetarnego może być pytaniem o możliwości utrzymania stabilności światowych ekosystemów i najważniejszych cykli biogeochemicznych regulujących warunki życia. A z perspektywy człowieka jest to pytanie o granice przekształceń biosfery, których przekroczenie zagrozi ciągłości naszej cywilizacji, gospodarki, kultury. Kultury, która jest dziedzictwem ostatnich 11 tysięcy lat bardzo stabilnych warunków planetarnych. Jak bardzo możemy „rozciągnąć” holocenijskie warunki środowiska, by świat pozostał bezpieczny dla człowieka (a raczej ludzkości rozumianej jako zbiorowość społeczeństw, powiązanych ze sobą i z ekosystemami Ziemi), by uniknąć katastrofalnych zmian? Jak daleko jesteśmy od tych granic? A może je już przekroczyliśmy? I czy jesteśmy w stanie to ocenić? Pytanie to zadali sobie naukowcy związani ze Sztokholmskim Centrum Badań nad Odpornością (Stockholm Resilience Centre). Ich praca, opublikowana w czasopiśmie „Nature” (Rockström i in., 2009), stała się przełomem w myśleniu o wpływie człowieka na globalny ekosystem, dając poważne argumenty do wyróżnienia nowej epoki geologicznej – antropocenu.

Zanim opiszemy koncepcję granic planetarnych, cofnijmy się o kilkadziesiąt lat, by przywołać inną przełomową pracę dotyczącą granic, z którymi musi się zderzyć ludzkość podążająca niezrównoważoną ścieżką rozwoju – czyli raportem Klubu Rzymskiego pt. „*Granice Wzrostu*” (Meadows i in., 1972). Autorzy „*Granice Wzrostu*” wyszli z założenia, że stały wzrost liczby ludzi, produkcji towarów, eksploatacji zasobów i wytwarzania odpadów oraz zanieczyszczeń (a jest to wzrost wykładniczy, w którym tempo zmian przyspiesza) nie da się pogodzić z prostym faktem, iż zasoby na naszej planecie są skończone, podobnie jak skończone są zdolności biosfery do zaabsorbowania wytwarzanych przez naszą cywilizację odpadów. Przeprowadzili symulację komputerową (było to jedno z pierwszych powszechnie znanych zastosowań modelowania komputerowego do symulacji systemu planetarnego), w której sprawdzili, jak świat będzie się rozwijał w kilku zadanych scenariuszach. Wśród nich był scenariusz zakładający zasadniczy brak zmian w kursie gospodarki i coraz bardziej konsumpcyjne nastawionych zachodnich społeczeństw. W tym scenariuszu model przewidział załamanie się naszej cywilizacji w połowie XXI wieku. Przyczyną miały być wyczerpujące się stopniowo zasoby (zwłaszcza w obliczu rosnących potrzeb coraz liczniejszej populacji) oraz kumulacja zanieczyszczeń, a wśród nich – gazów cieplarnianych, skutkujących zmianą klimatu (autorzy „*Granice wzrostu*” przewidzieli niezwykle celnie aktualny poziom CO₂ w atmosferze). Książka ta zawierała również rekomendacje ograniczeń w zużywaniu zasobów i produkcji dóbr materialnych, które powinniśmy byli sobie nałożyć, by uniknąć katastrofy. Jak wiadomo, z rekomendacji tych nie skorzystano.

Antropocen jest proponowaną epoką geologiczną sięgającą początku znaczącego oddziaływania człowieka na geologię i ekosystemy Ziemi, w tym między innymi poprzez antropogeniczną zmianę klimatu. Formalnie nie został dotychczas (marzec 2020) zatwierdzony przez Międzynarodową Komisję Stratygrafii (ICS), choć od 2016 roku jest rekomendowany przez Grupę Roboczą ds. Antropocenu (AWG). W obecnym znaczeniu termin ten spopularyzował w 2000 roku chemik Paul J. Crutzen.

Typowe dla holocenu, czyli epoki geologicznej rozpoczętej ok. 11,7 tys. lat temu, po zakończeniu ostatniego zlodowacenia. Holocen cechował się wyjątkowo stabilnymi warunkami klimatycznymi.



KLIMATYCZNE ABC

O raporcie „*Granice wzrostu*” możesz przeczytać też w lekcji 8.

Model Meadows i innych opierał wyłącznie się na parametrach systemu społecznego i gospodarczego, takich jak przyrost populacji ludzkiej, produkcja żywności, rozwój przemysłu, emisja zanieczyszczeń i zużycie zasobów, a przewidywany kryzys wynikać miał przede wszystkim z przecięcia krzywych wzrostu liczby ludności ze spadającą ilością zasobów i pogarszającą się jakością środowiska.

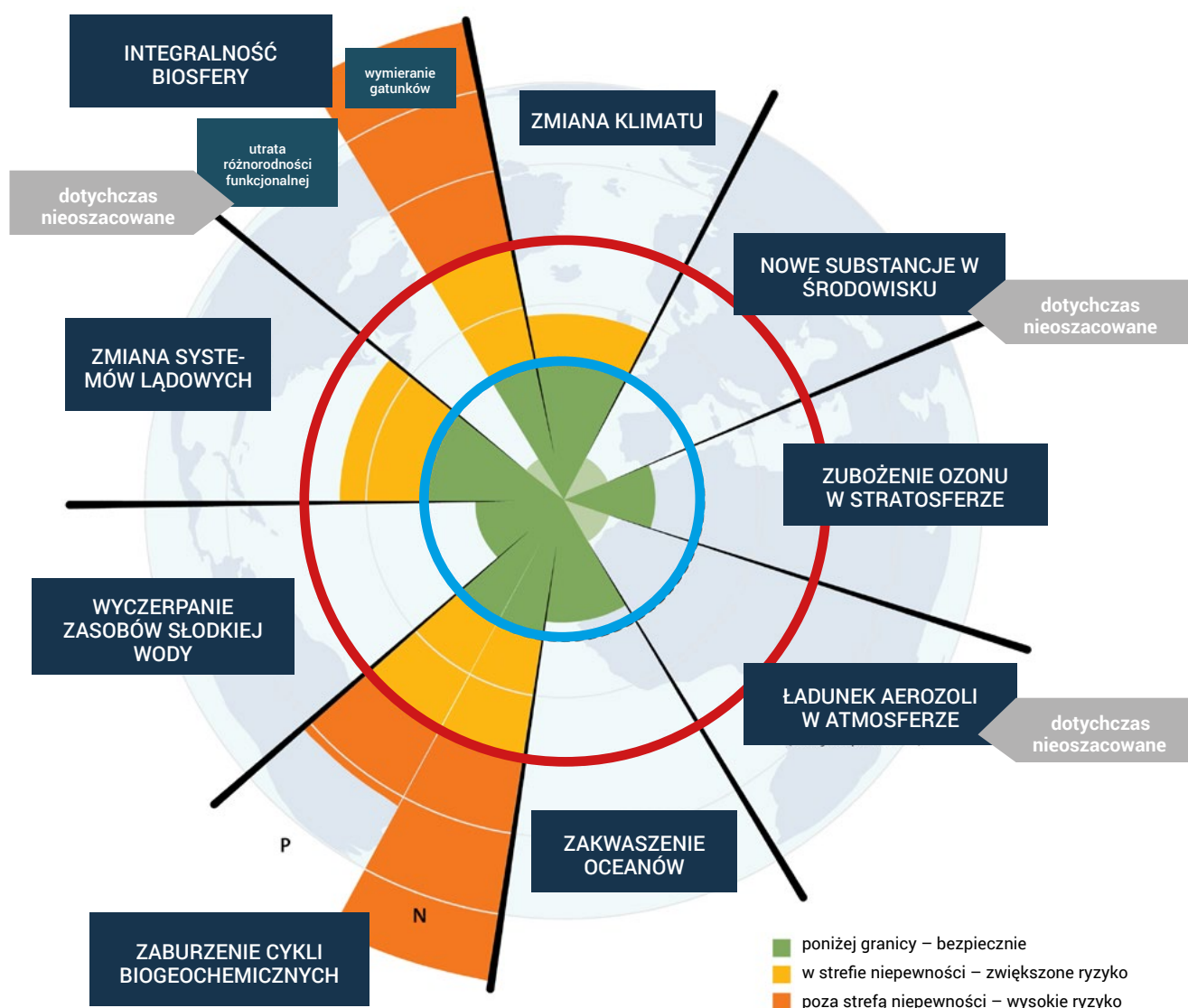
Koncepcja Granic Planetarnych Rockstroma i innych (2009) różni się od podejścia z „*Granice Wzrostu*” przede wszystkim tym, że analizuje, jak poszczególne rodzaje antropopresji wpłyną na funkcjonowanie globalnego systemu przyrodniczego, który podtrzymuje funkcjonowanie naszej cywilizacji. Traktuje więc system planetarny jako zintegrowany system społeczno-ekologiczny. To założenie jest spójne z koncepcją antropocenu jako epoki, w której działalność człowieka znacząco modyfikuje wpływ czynników przyrodniczych na funkcjonowanie Ziemi.

W koncepcji **Granic Planetarnych** wyróżniono 9 antropogenicznych procesów, wpływających na zdolność naszej planety do zachowania obecnych, pożądanych warunków – holocenńskiego stanu równowagi, który umożliwiał ludzkości rozwój przez ostatnie 10 tysięcy lat. Są to:

1. zmiana klimatu,
2. zakwaszenie oceanów,
3. zmniejszanie warstwy stratosferycznego ozonu,
4. zaburzenia cyklu azotowego i fosforowego,
5. powstawanie antropogenicznych aerozoli (drobnych cząstek) w atmosferze,
6. wyczerpywanie zasobów słodkiej wody,
7. zmiana systemów lądowych,
8. spadek różnorodności biologicznej,
9. zanieczyszczenia chemiczne i wprowadzanie nowych substancji do przyrody.

Pierwsze trzy procesy to systemowe przejawy antropopresji o skali planetarnej. Pozostałych sześć to oddziaływania o charakterze bardziej lokalnym lub regionalnym, jednak ich kumulacja może powodować efekty w skali całego świata. Ponadto pierwsze dwa procesy – zmiana klimatu i zakwaszenie oceanów – różnią się od pozostałych istnieniem wyraźnych punktów krytycznych, po których przekroczeniu zmiany zaczynają zachodzić same, napędzane kaskadą dodatnich sprzężeń zwrotnych. Pozostałe procesy to zmiany o charakterze bardziej liniowym, bez jasno zdefiniowanych punktów krytycznych, co jednak nie znaczy, że są one mniej niebezpieczne. Następnie autorzy zastanowili się, gdzie w obrębie tych dziewięciu obszarów antropopresji znajdują się granice odporności, których przekroczenie grozi destabilizacją ziemskiego systemu. Które z nich przekroczyliśmy, a które są niebezpiecznie blisko? Analizę z 2009 roku powtórzono w kolejnej pracy tego samego zespołu naukowców opublikowanej w 2015 roku (Steffen i in., 2015), a jej wyniki streszcza poniższy wykres.





Rysunek 5: Granice Planetarne, za Steffen i in., (2015).

Źródło: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

Granice planetarne wyznaczone z zakresem niepewności, który mieści się pomiędzy niebieskim i czerwonym okręgiem. Zaznaczone na zielono obszary to strefa bezpieczna, na żółto i pomarańczowo oznaczono obszar niepewności, a czerwonym kolorem te obszary, dla których granice planetarne zostały przekroczone, wraz z obszarem niepewności. Szary kolor oznacza obszary wciąż nieoszacowane w skali globalnej (według stanu na 2015 rok).

W kontekście naszego kursu istotne jest zrozumienie, że **zmiana klimatu** to wcale nie najbardziej naruszona granica planetarna. Jesteśmy tu wciąż w obszarze niepewności, co oznacza, że jeszcze mamy szansę na uniknięcie przekroczenia granicy planetarnej związanej z gwałtowną zmianą klimatu. Jaka jest sytuacja w innych obszarach?

Najbardziej zaawansowane presje na biosferę, które zdaniem naukowców bezspornie przekroczyły bezpieczne wartości, to **utrata różnorodności biologicznej i zaburzenie cykli biogeochemicznych azotu i fosforu**.

Utrata różnorodności biologicznej (dotychczas oceniona na poziomie genetycznym, a wciąż nieoszacowana w skali świata na poziomie funkcjonalnym) to proces wymierania gatunków spowodowany przez człowieka na wiele sposobów. Wśród nich jest bezpośrednia eksploatacja – polowania czy rybołówstwo, ale niemniej ważną przyczyną są zmiany w obrębie innych z 9 analizowanych obszarów. Na przykład w przypadku roślin i owadów najważniejszą przyczyną wymierania jest zanikanie siedlisk w wyniku zamiany naturalnych ekosystemów lądowych w tereny rolnicze. Szacuje się, że gatunki wymierają dziś w tempie ponad 1000 razy szybszym od naturalnego, a status zagrożonych może mieć nawet milion z nich. Wśród nich te, od których bezpośrednio zależy: owady zapylające nasze uprawy, ryby, którymi się żywimy, czy wielkie drapieżniki, których „od góry” stabilizują piramidę troficzną, zapewniając ciągłość funkcjonowania ekosystemów.

Zaburzenie **cykli azotu i fosforu** to efekt nawożenia, emisji ścieków do środowiska oraz uwalniania tych pierwiastków w procesach przemysłowych. Ich zwiększona ilość w przyrodzie powoduje **eutrofizację**, czyli przeżyźnienie ekosystemów. To zjawisko zachodzi zarówno na lądzie, jak i w rzekach, jeziorach i morzach. Eutrofizacja ekosystemów lądowych powoduje szybki spadek różnorodności biologicznej roślin, a w następstwie tego również wymieranie owadów i innych grup zwierząt. W ekosystemach wodnych wzrost dostępności azotu i fosforu jest przyczyną zakwitów glonów (w tym toksycznych sinic), której efektem są deficyty tlenu i tak zwane martwe strefy przydenne w zbiornikach wodnych. Eutrofizacja w wodach zwiększa też globalne ocieplenie, bowiem z osadów gromadzących się w przeżyźnionych wodach uwalniają się duże ilości metanu.

Obok zmiany klimatu również stopień zaawansowania **zmian w systemach lądowych** umieszczono w obszarze niepewności, co wskazuje, że może być jeszcze szansa powstrzymania degradacji ekosystemów lądowych w stopniu destabilizującym Ziemię. A to w ekosystemach lądowych znajduje się większość światowej różnorodności biologicznej. One też zawierają ogromną pulę węgla organicznego, wpływając na jego obieg w przyrodzie. Dziś użytkujemy rolniczo 50% możliwej do zagospodarowania powierzchni lądów, a tempo niszczenia lasów i mokradeł wciąż rośnie.

Trzy „zielone” obszary na wykresie nie przekroczyły jeszcze bezpiecznego zakresu zmian. Wśród nich najbliższej niebezpiecznej granicy jest **zakwaszenie oceanów**, bezpośrednio powiązane z zawartością dwutlenku węgla w atmosferze i będące efektem rozpuszczania się tego gazu w wodzie morskiej. Zakwaszenie oceanów ma nie tylko wspólną przyczynę ze zmianą klimatu, procesy te łączy też istnienie punktów krytycznych, po przekroczeniu których zmiany zaczynają nagle przyspieszać. W przypadku zakwaszenia ten punkt krytyczny to warunki, w których nie mogą funkcjonować koralowce i inne organizmy budujące szkielety z węglanu wapnia, a więc znika ważny biologiczny mechanizm usuwania dwutlenku węgla z wody.

Zaskakiwać może stosunkowo optymistyczne oszacowanie stanu zasobów **wody słodkiej** w skali świata. Choć ich wyczerpywanie się jest dotkliwym



problemem w wielu rejonach świata, okazuje się, że nie jest to problem mogący dziś zagrozić destabilizacją przyrody w skali globalnej. Z kolei zielony kolor wykresu dotyczącego **warstwy ozonowej** to efekt porozumienia w ramach Protokołu Montrealskiego z 1987 roku, dzięki któremu udało się wyeliminować z rynku niszczące stratosferyczny ozon freony. Wykres granic planetarnych dla roku 1990 jest dla warstwy ozonowej czerwony, pokazując znaczne przekroczenie granicy bezpieczeństwa.

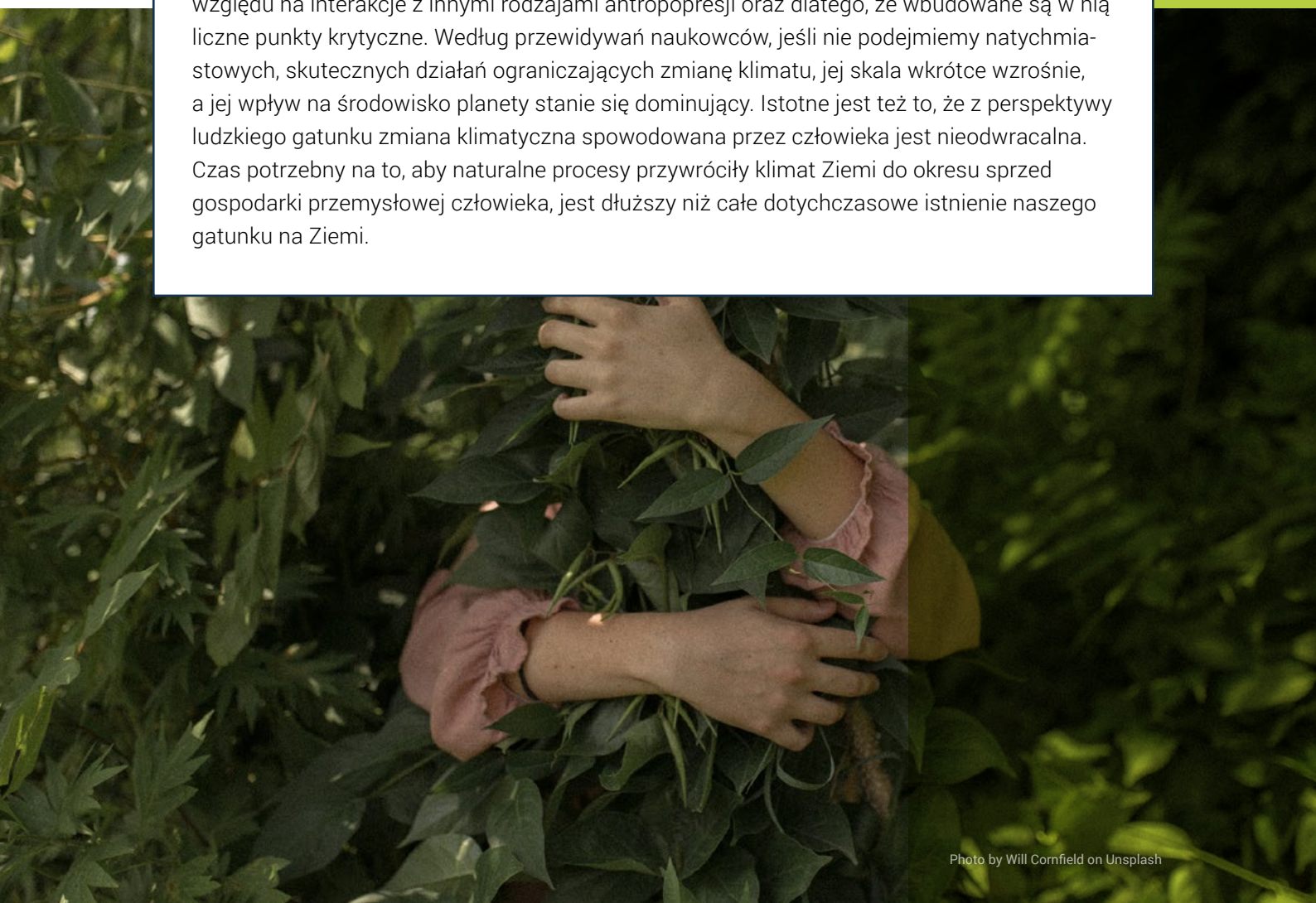
Aerozole atmosferyczne, powstające wskutek emisji drobnych pyłów i innych substancji, oraz „**nowe substancje w środowisku**” to presje, dla których w 2015 roku nie oszacowano jeszcze stopnia zaawansowania. W ciągu ostatnich lat pojawia się coraz więcej prac wskazujących na znaczący stan zaawansowania zmian w tym ostatnim obszarze. Zaliczono tu bardzo różne rodzaje „zanieczyszczeń” – m.in. antybiotyki wywołujące powszechną antybiotykooporność bakterii, genetycznie zmodyfikowane „owadobójcze” rośliny uprawne, wywołujące wykształcanie się odporności u owadów, chemiczne środki ochrony roślin, a także niezmiernie już powszechny w środowisku plastik, którego całłościowego wpływu na organizmy wciąż jeszcze dobrze nie znamy.



O koncepcji granic planetarnych (*planetary boundaries*) dowiesz się więcej tu »

ZAPAMIĘTAJ!

Podsumowując, zmiana klimatu **w tej chwili** jeszcze nie destabilizuje systemu przyrodniczego planety tak silnie, jak inne wymienione wyżej czynniki. Jest jednak szczególnie istotna, ze względu na interakcje z innymi rodzajami antropopresji oraz dlatego, że wbudowane są w nią liczne punkty krytyczne. Według przewidywań naukowców, jeśli nie podejmiemy natychmiastowych, skutecznych działań ograniczających zmianę klimatu, jej skala wkrótce wzrośnie, a jej wpływ na środowisko planety stanie się dominujący. Istotne jest też to, że z perspektywy ludzkiego gatunku zmiana klimatyczna spowodowana przez człowieka jest nieodwracalna. Czas potrzebny na to, aby naturalne procesy przywróciły klimat Ziemi do okresu sprzed gospodarki przemysłowej człowieka, jest dłuższy niż całe dotychczasowe istnienie naszego gatunku na Ziemi.





**KLIMATYCZNE
ABC**

**ZBIGNIEW BOHDANOWICZ
MAGDALENA BUDZISZEWSKA**

Społeczne i psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu

Zmieniający się klimat wpłynie na większość aspektów naszego życia. Przesunięcia stref klimatycznych, częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych oraz zmiany w świecie przyrody wiążą się z poważnymi konsekwencjami dla społeczeństw, a świadomość tych zmian negatywnie wpływa na kondycję psychiczną ludzi. W kolejnych częściach lekcji dowiesz się o konsekwencjach społecznych (nierównościach dochodowych i migracjach) oraz psychologicznych (wpływie świadomości zmian na samopoczucie, emocje, poziom stresu).

Część zmian społecznych widoczna jest już dziś. Na przykład mieszkańcy Kiribati migrują do innych krajów, bo ich kraj jest stopniowo wchłaniany przez podnoszące się wody oceanu. Najuboższe, zależne od rolnictwa kraje szczególnie dotkliwie odczuwają zaburzenia stałych rytmów opadów i zmian pór roku. Ekonomiści, socjologowie, lekarze i specjaliści innych dziedzin starają się przewidzieć, jakich jeszcze i jak poważnych zmian możemy się spodziewać w przyszłości i jak wpłyną one na społeczeństwa.

Bardzo ważne jest też zrozumienie sytuacji jednostki, bo widzimy, że pełne zagrożenia prognozy mają wpływ na obecną kondycję psychiczną ludzi. Psychologowie pracują nad tym tematem już od dłuższego czasu, a największe profesjonalne towarzystwa branżowe opracowały alarmujące raporty. Okazuje się, że świadomość powagi sytuacji ma negatywny wpływ na kondycję psychiczną. Rozumienie skali zagrożenia jest mocno stresujące, szczególnie dla osób zaangażowanych w działanie na rzecz zapobieżenia katastrofie klimatycznej. Dlatego w drugiej części rozdziału wyjaśnimy mechanizm powstawania określonych reakcji psychologicznych oraz przekażemy rekomendacje dotyczące radzenia sobie ze stresem. Zostały one opracowane w kontekście klimatu, ale mogą się przydać również w innych sytuacjach życiowych.

Wpływ zmiany klimatu na nierówności i migracje na świecie

W tej części dowiesz się jakie konsekwencje dla życia ludzkich społeczności mogą mieć zmiany prognozowane przez modele klimatyczne. Zobaczmy, co na ten temat pisano w kolejnych raportach IPCC oraz jakie informacje pojawiają się w pracach naukowych na ten temat. W szczególności przyjrzymy się, jaki wpływ zmiana klimatu ma na poziom nierówności dochodowych oraz na skalę międzynarodowych migracji.

Badania ekonomiczne pokazują, że zmiana klimatu zwiększa nierówności pomiędzy krajami. W ubogich krajach duża część dochodu narodowego jest generowana w rolnictwie, które jest najbardziej wrażliwe na anomalie pogodowe, takie jak nieregularne opady czy gwałtowne zmiany temperatury. Dlatego ubogie kraje są już teraz znacząco poszkodowane skutkami zmiany klimatu. Badanie Diffenbaugh i Burke'a (2019) pokazuje, na podstawie analizy danych z lat 1961–2010, że zmiana klimatu obniżyła dochód na osobę w najbiedniejszych krajach o 17–30 procent (szczególnie w Sudanie, Indiach, Nigerii, Indonezji i Brazylii). Z drugiej strony, to badanie pokazuje, że bogatsze, rozwinięte kraje nie tylko nie ucierpiały, ale wręcz odniosły korzyści ekonomiczne w badanym okresie (Norwegia, Kanada, Szwecja, Wielka Brytania i Francja).

Należy jednak zaznaczyć, że w przytoczonym badaniu analizowano tylko kilka czynników (średnia temperatura, łączny poziom opadów i czas) i nie uwzględniono innych zmian, które w przyszłości będą coraz intensywniej występować w wyniku zmiany klimatu: nieregularne opady, pożary, susze, gwałtowne zmiany temperatur, wyższy poziom mórz. W efekcie nasilenia tych zjawisk można przypuszczać, że w przyszłości także w krajach bogatych zmiana klimatu będzie negatywnie wpływać na poziom dochodu.

O tym, że konsekwencje zmiany klimatu będą różne w poszczególnych rejonach świata, wiemy od dawna. Już pierwszy raport IPCC z 1990 roku wyraźnie mówi o tym zróżnicowaniu. Autorzy raportu podkreślają, że społeczno-gospodarcze skutki oddziaływań będą bardziej odczuwalne w tych regionach świata, w których społeczeństwa i powiązane z nimi gospodarki są uzależnione od naturalnych ekosystemów lądowych. Ubogie kraje będą szczególnie zagrożone, ponieważ już teraz ich rolnictwo jest na granicy możliwości radzenia sobie ze skutkami zmiany klimatu. Z powodu rosnącego poziomu mórz zagrożone jest istnienie krajów wyspiarskich, takich jak Malediwy, Tuvalu i Kiribati, osiedli ludzkich położonych w gęsto zaludnionych deltach rzek oraz obszarów przybrzeżnych (Egipt, Bangladesz, Indie, Chiny, Indonezja). Bogate kraje również będą poszkodowane z powodu rosnącego poziomu oceanów, jednak mają one więcej możliwości, aby sobie radzić z tymi skutkami. Autorzy wskazują też na



Artykuły opisujące wpływ zmian klimatu na dochód w krajach rozwijających się:

Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century »

The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries »



Artykuł opisujący wpływ zmiany klimatu na nierówności dochodowe pomiędzy krajami autorstwa N. Diffenbaugh i M. Burke (2019) »



Pierwszy raport IPCC z 1990 roku jest dostępny na stronie www.ipcc.ch »

niebezpieczeństwo suszy, która może negatywnie wpłynąć na zaopatrzenie w żywność i dostępność słodkiej wody na znacznych, obecnie gęsto zaludnionych obszarach. Wzrost średniej temperatury może w regionach okołobiegunowych otworzyć nowe możliwości dla osiedlania się ludzi, jednak należy pamiętać, że roztopienie wiecznej zmarzliny destabilizuje grunt, utrudnia rozbudowę infrastruktury oraz zagraża istniejącym budynkom.

Najpoważniejsze skutki zmiany klimatu mogą być związane z migracją ludności, ponieważ miliony ludzi będą zmuszone do opuszczenia swoich domów w wyniku zalania terenów nadmorskich oraz poważnych susz. Wiele krajów, do których ci ludzie będą uciekać, prawdopodobnie nie będzie mogło zagwarantować im opieki zdrowotnej czy innego wsparcia.

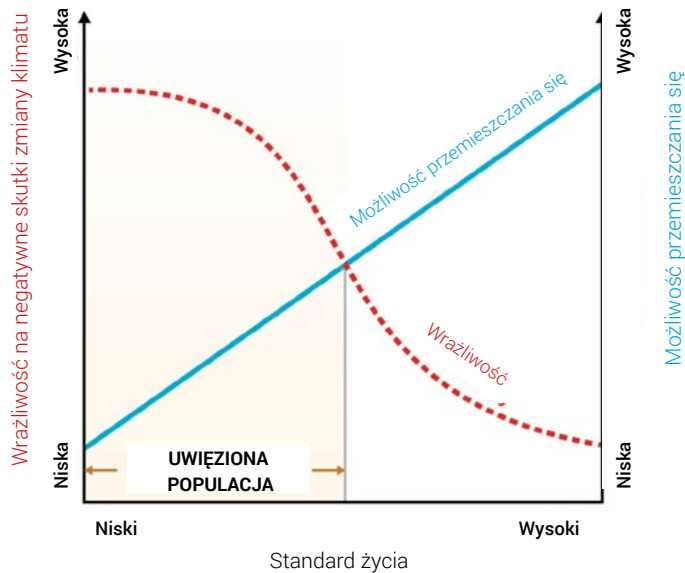
We wnioskach końcowych raportu IPCC z 1990 roku czytamy:

Spółeczność światowa uznaje potrzebę podjęcia działań w celu ograniczenia skutków zmiany klimatu. Konkretnie działania powinny następować po ocenie potencjalnego wpływu na biosferę i działalność człowieka oraz po oszacowaniu kosztów netto środków dostosowawczych. Niektóre skutki, takie jak podnoszenie się poziomu morza, będą prawdopodobnie postępować powoli, ale stabilnie, podczas gdy inne, takie jak przesunięcia stref klimatycznych, które zwiększą częstość takich zdarzeń jak powodzie, susze i gwałtowne sztormy, mogą wystąpić w sposób nieprzewidywalny. Regiony i kraje różnią się znacznie pod względem wrażliwości na takie zmiany i wynikające z nich skutki. Ogólnie rzecz biorąc, działalność człowieka w krajach rozwijających się jest bardziej niż w krajach rozwiniętych narażona na zakłócenia związane ze zmianą klimatu.

Zdolność krajów rozwijających się do przystosowania się jest mniejsza ze względu na ich ograniczone zasoby, problemy z zadłużeniem oraz trudności w rozwoju ich gospodarek w sposób zrównoważony i sprawiedliwy. Kraje te będą potrzebowały pomocy w opracowywaniu i wdrażaniu odpowiednich rozwiązań.

Kolejne edycje raportów IPCC nie zmieniają ogólnych prognoz i konkluzji zawartych w pierwszym raporcie, lecz uzupełniają je o bardziej szczegółowe informacje.

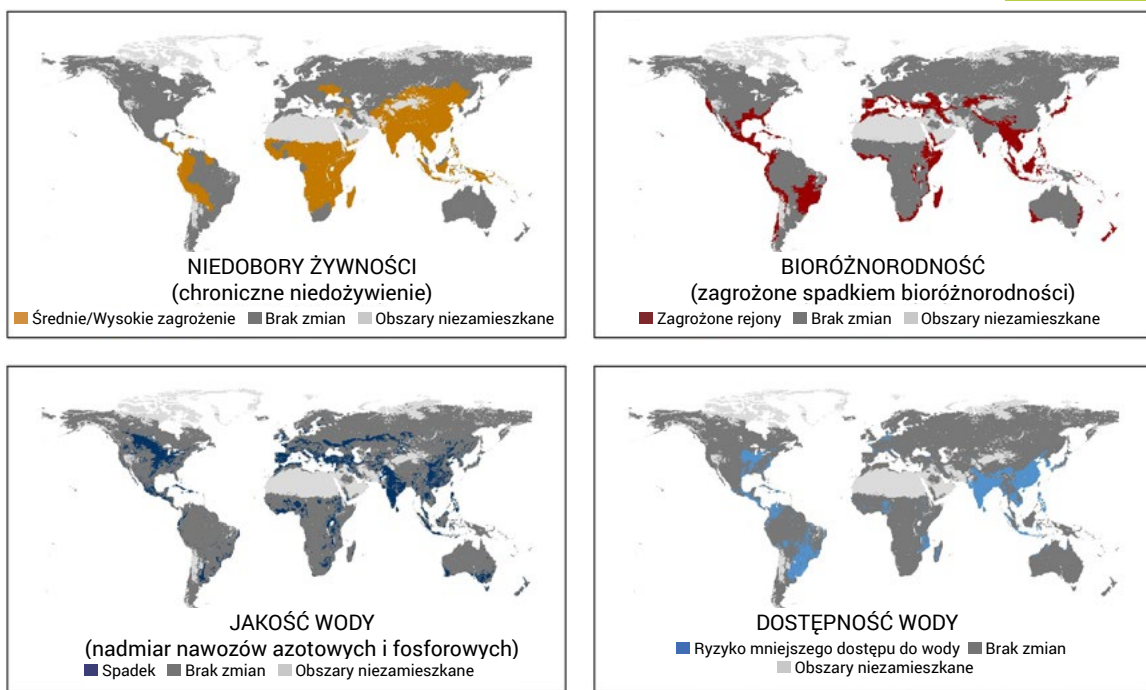
Zmiana klimatu prowadzi nie tylko do zwiększania nierówności pomiędzy krajami, ale także wewnątrz nich. Raport IPCC z 2014 roku wskazuje, że najubożsi, niezależnie, czy w bogatych, czy ubogich krajach, poniosą dysproporcjonalnie wysoki koszt zmian klimatycznych. Te osoby mają mniejsze możliwości radzenia sobie ze szkodami spowodowanymi katastrofami naturalnymi, m.in. dlatego, że nie mają oszczędności, są bardziej zagrożone bezrobociem i nie stać ich na ubezpieczenie dobytku. Dlatego straty, których będą doświadczać osoby o niskich dochodach, będą dotkliwsze niż w przypadku reszty społeczeństwa, niezależnie od kraju. Dodatkowo, ich możliwości zmiany miejsca zamieszkania są ograniczone. W efekcie wiele osób może się znaleźć w trudnej sytuacji bez wyjścia (rysunek 1).



Rysunek 1: Zależność między wrażliwością na zmianę klimatu a mobilnością. Wykres pokazuje, że społeczności najbardziej narażone na negatywne skutki zmiany klimatu mogą jednocześnie mieć najmniejsze możliwości migracji.

Źródło: raport IPCC, 2014, WGIIAR5 »

Raport IPCC z 2019 roku (*Climate Change and Land*) pokazuje na mapach wyniki analiz i symulacji prognozujących zmiany, których możemy się spodziewać w kolejnych dekadach. Poniższe wizualizacje pokazują, na jakich obszarach mogą występować szczególnie dotkliwe trudności. Na grafikach zaznaczone są rejony, gdzie spodziewane są niedobory żywności, zanik bioróżnorodności czy problemy z dostępnością i jakością wody.



Rysunek 2: Obszary, na których w związku ze zmianą klimatu mogą wystąpić niedobór żywności, zanik bioróżnorodności oraz problemy z dostępnością i jakością wody.

Źródło: IPCC, 2019, *Climate Change and Land*, www.ipcc.ch/srccl

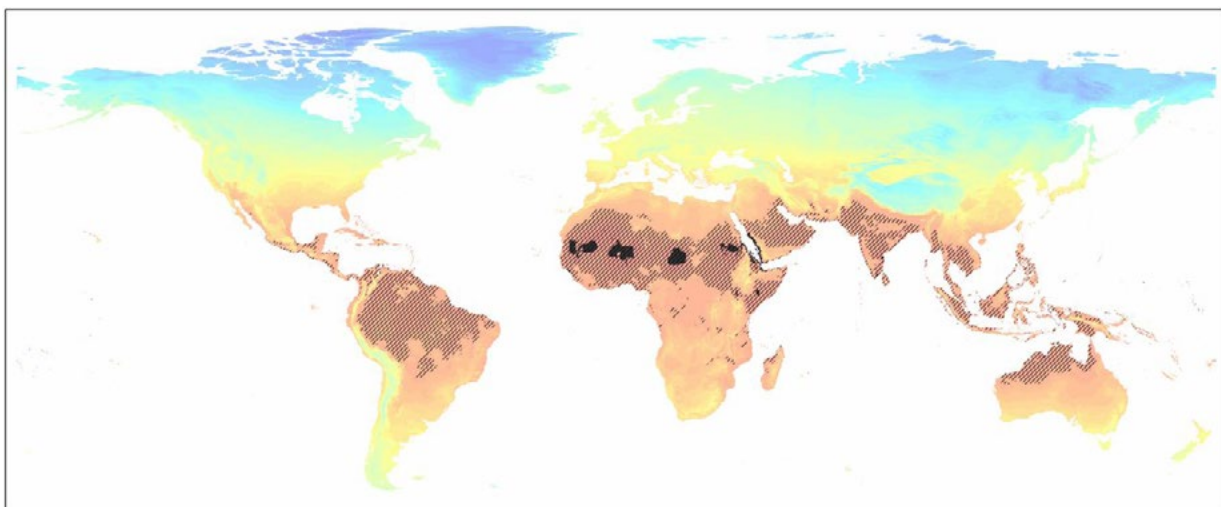
Na podstawie powyższych prognoz widać, że szczególnie zagrożone są obszary południowej Azji, gdzie jednocześnie mogą wystąpić problemy z dostępnością wody oraz żywności.

Analizując geograficzne różnice w oddziaływaniu zmiany klimatu, należy pamiętać, że pogorszy ona sytuację wszystkich rejonów świata, również tych relatywnie mniej zagrożonych. Zmiany zaburzające proces produkcji żywności oraz ograniczające dostęp do słodkiej wody mogą doprowadzić do szeregu problemów: drastycznych zmian cen żywności, a w konsekwencji kryzysów humanitarnych, destabilizacji politycznej oraz konfliktów. Te skutki będą odczuwalne na całym świecie, nie tylko w najbardziej dotkniętych regionach.

Prognozy IPCC znajdują potwierdzenie w najnowszych opracowaniach naukowych, które wskazują, że niebezpieczeństwo wystąpienia spektakularnych, negatywnych zmian w najbliższych dekadach jest realne i poważne. Na przykład badanie opublikowane w maju 2020 roku przez Xu, Kohlera, Lentona, Svenninga i Scheffera wskazuje, że jeśli ludzkość będzie działać według scenariusza opisanego przez IPCC jako kontynuacja obecnego trendu, bez radykalnych redukcji emisji gazów cieplarnianych („*business as usual*”), to już za 50 lat świat może wyglądać zupełnie inaczej. Według tych analiz na obszarach zamieszkałych przez 1/3 przyszłej ludności Ziemi temperatury zbliżą się do panujących obecnie na Saharze, uniemożliwiając w tych miejscach życie ludzi i większości ssaków.



Wyniki badania Xu, Kohler, Lenton, Svenning i Scheffer pt. Future of the human niche (2020). »



Średnia roczna temperatura



■ obszar o średniej rocznej temperaturze wyższej niż 29 st. C. – rok 2020.

■ obszar o średniej rocznej temperaturze wyższej niż 29 st. C. – rok 2070.

Rysunek 3: Ekspansja ekstremalnie gorących regionów do roku 2070 w scenariuszu klimatycznym bez ograniczania emisji gazów cieplarnianych („*business-as-usual*”).

Źródło: Chi Xu et al. PNAS doi:10.1073/pnas.1910114117

Efekty zmiany klimatu rozkładają się – niestety – niesprawiedliwie. Kraje ubogie, które w niewielkim stopniu przyczyniły się do zmian klimatu, już teraz ponoszą większe konsekwencje negatywnych zmian niż kraje bogate. Prognozy pokazują, że te różnice jeszcze się zwiększą w przyszłości. Ponadto ze zmianą klimatu wiąże się niesprawiedliwość międzypokoleniowa. Starsze pokolenia, żyjące w krajach rozwiniętych, korzystały z rosnącego dobrobytu i szybkiego wzrostu gospodarczego, możliwego między innymi dzięki spalaniu paliw kopalnych. Natomiast większość negatywnych konsekwencji obciążą młodsze i przyszłe pokolenia, które „odziedziczą” ten bardzo trudny do rozwiązania problem.

Dlatego tak ważne jest, aby już dziś podejmować działania, które ograniczą i opóźnią zmianę klimatu. Ma to bardzo duże znaczenie dla warunków życia w – już całkiem niedalekiej – przyszłości.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:



Country-level social cost of carbon
Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K. et al. »

Global non-linear effect of temperature
on economic production.
Burke, M., Hsiang, S. & Miguel, E. »

Climate Change and Social Inequality.
Islam, N., Winkel, J. »

Obszerny raport o wpływie zmiany klimatu na
migracje i środowisko, opracowany przez
International Organization for Migration
(IOM, 2009) »

Strona pokazująca rejony zagrożone brakiem
dostępu do słodkiej wody »

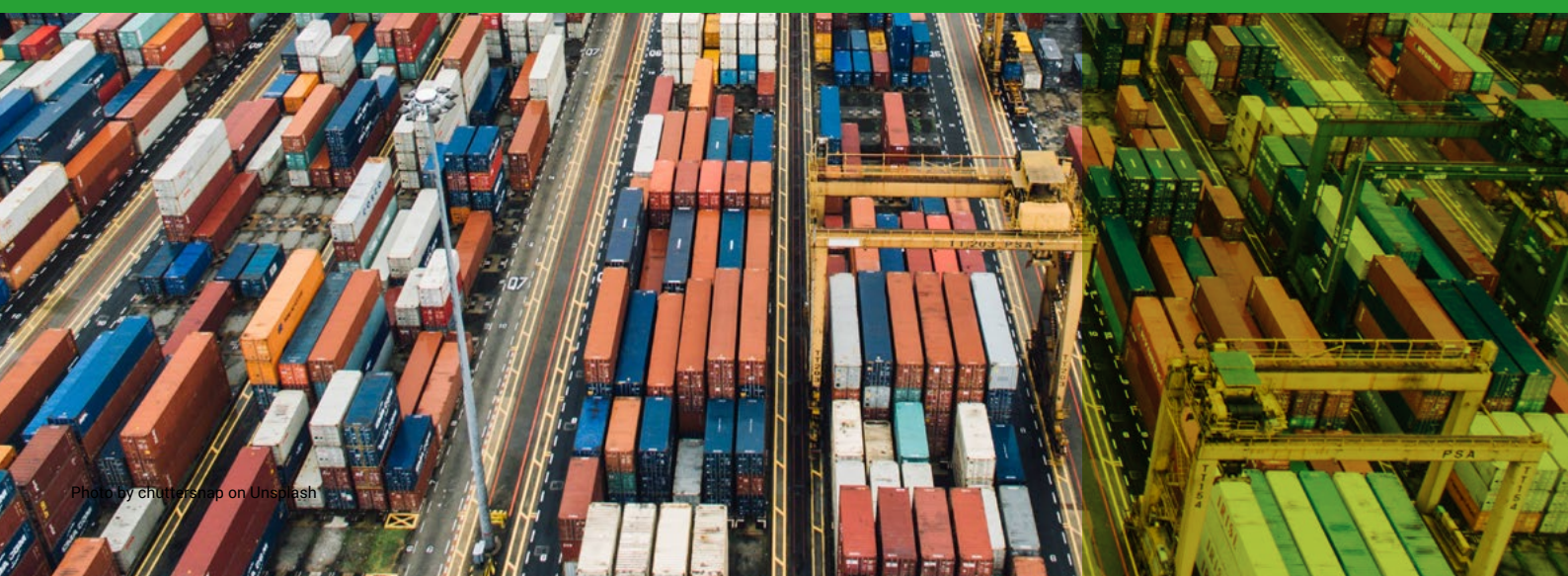


Materiały z portalu Ziemia na Rozdrożu:

Migracje wywołane zmianami klimatu prze-
kroczą wszystkie wcześniejsze migracje »

ONZ: migrantów klimatycznych nie można
odsyłać z kraju do którego przybyli »

Przemoc i konflikty o wodę w ostatniej
dekadzie »



Konsekwencje psychologiczne zmiany klimatu

Zmiana klimatu będzie skutkować konsekwencjami dla zdrowia, zdrowia psychicznego i ludzkich emocji. Jej zrozumienie może być mocno obciążające psychologicznie. Istnieją jednak strategie i działania, które pozwalają sobie z tym radzić.

ZMIANA KLIMATU JEST PROBLEMEM LUDZI

Amerykańskie Towarzystwo Psychologiczne opracowało dwa raporty dotyczące psychologicznych konsekwencji globalnego ocieplenia (APA, 2014, 2017). Pokazują one, w jaki sposób zagrożenia i straty związane ze zmianą klimatu przekładają się nie tylko na zagrożenia dla życia i fizycznego zdrowia ludzi, ale także na emocje, stres i zdrowie psychiczne.

Jak stwierdzają oba raporty APA (2014, 2017), zmiana klimatu wpłynie na kluczowe elementy bezpieczeństwa i infrastruktury ludzkiej cywilizacji. Są nimi produkcja żywności i dostęp do wody, infrastruktura w miastach i na wsi, transport, energia, bezpieczeństwo oraz funkcjonowanie całych sektorów gospodarki.

Pod tymi opisowymi stwierdzeniami kryje się ryzyko zniszczenia życia całych społeczności, na skutek załamania się funkcjonowania infrastruktury, instytucji i relacji międzyludzkich. Dla ludzi oznacza to głód, choroby, śmierć, wymuszone migracje i zwiększone ryzyko konfliktów zbrojnych. W sprawozdaniu przedstawionym ONZ na temat związku zmiany klimatu z ubóstwem i prawami człowieka sformułowano wnioski pokazujące, że nawet w najlepszym przypadku, czyli ograniczenia ocieplenia do 1,5 stopnia, 500 milionów ludzi będzie narażonych na braki w dostępie do wody, a 4,5 miliarda ludzi na fale upałów. Podstawowe prawa człowieka: prawo do życia, do dostępu do mieszkań, wody, jedzenia, ale też demokracja i rządy prawa będą naruszane, a ludzie będą doświadczać ubożenia, biedy i skrajnej biedy (ONZ, 2019). Raporty Banku światowego mówią, że do 2030 roku zmiana klimatu może wepchnąć w biedę dodatkowe 100 milionów ludzi.

Globalny charakter współczesnej cywilizacji sprawia, że wszystkie państwa będą dotknięte coraz poważniejszymi konsekwencjami zmiany klimatu. Konsekwencje te będą rozlewać się szeroko po sieciach współzależności zarówno w ramach biologicznych ekosystemów, jak i globalnej ludzkiej cywilizacji (Rockström i in., 2009). Trudna do wyobrażenia jest zwłaszcza bezsilność, z jaką mieszkańcy bardziej uprzywilejowanych części świata będą przyglądać



Raporty APA:

Beyond Storms and Droughts: The Psychological Impacts of Climate Change »

Mental health and our changing climate: impacts, implications, and guidance »



Więcej możesz przeczytać tu:

Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity »

The ecological economics of land degradation: impacts on ecosystem service values. »



Raport ONZ

Climate change and poverty: report of the Special Rapporteur on Extreme Poverty and Human Rights »



Raport Banku Światowego

www.worldbank.org »



się losowi tych, których katastrofa klimatyczna dotknie w pierwszej kolejności. Będą oni jednocześnie doświadczać pogarszania się własnych warunków życia i wiedzieć, że prognozy dla ich własnej części świata także nie są najlepsze. Utrudni to lub uniemożliwi wzajemną pomoc.

SKALA BĘDZIE BEZ PRECEDENSU

Oczywiście omawiane zjawiska nie są tylko sprawą przyszłości, globalnie już mają miejsce. Obserwujemy susze, pożary, pogarszanie się warunków życia, głód, zwiększanie się ubóstwa i nierówności oraz konflikty zbrojne i przymusowe migracje. Jednak skala tych zjawisk, jaką wywoła przekroczenie „bezpiecznego” progu ocieplenia klimatu, będzie zupełnie bez precedensu i dotknie nie tylko kraje ubogie i rozwijające się, ale wszystkie państwa.

Światowa organizacja zdrowia (WHO, 2018) uznała zmianę klimatu za największe wyzwanie cywilizacyjne XXI wieku i podkreśliła, że jej wpływ na życie i zdrowie ludzkie pozostaje niedoszacowany, a społeczności są na niego nieprzygotowane.

Dopiero z tej perspektywy, kryzysu klimatycznego, jako długoterminowej katastrofy humanitarnej bez precedensu w historii ludzkości, można zrozumieć ciężar konsekwencji psychologicznych.

KONSEKWENCJE PSYCHOLOGICZNE: OSTRE I STOPNIOWE

Autorzy raportów APA (2014, 2017) podzielili konsekwencje tych zmian dla ludzi na ostre i stopniowe. Te pierwsze dotkną osób i społeczności bezpośrednio doświadczonych katastrofami. Do grupy zmian ostrych należą: trauma, szok, ostre zaburzenia związane ze stresem, zespół stresu pourazowego (PTSD). Nagłe straty, przykładowo utrata zdrowia, majątku, miejsca pracy, są sytuacją graniczną. W takich warunkach rośnie liczba samobójstw, prawdopodobieństwo przemocy, na ryzyko narażona jest więc społeczna i trwałość instytucji publicznych.

W odróżnieniu od ostrych, nagłych sytuacji, stopniowy wpływ zmiany klimatu także będzie powodować konsekwencje psychologiczne. Są one konsekwencjami stopniowego pogarszania się warunków życia, ale także jego antycypacji oraz świadomości ryzyka przekroczenia punktów krytycznych w systemie klimatycznym planety. Zwłaszcza antycypacyjne emocje (czegoś jeszcze nie ma, ale oczekujemy, że się wydarzy) są wyjątkowo trudne w tym kontekście.

Doherty i Clayton (2011) wskazują na szczególną sytuację psychologiczną mieszkańców relatywnie bogatych i wysoko rozwiniętych społeczeństw globalnej północy. Zmiana klimatu jest zagrożeniem, które może wydawać się mieszkańcom zasobnej północy względnie odległe i jeszcze niewidoczne. Mówiąc precyzyjniej – zjawisko jest widoczne, ale nie jest ewidentna jego przyszła skala oraz jego nielinearny charakter.

Należałoby na nie zareagować, zanim wymknie się całkowicie spod kontroli, ponieważ po przekroczeniu punktów krytycznych może okazać się to niemożliwe. W rzeczywistości im wcześniej zareagujemy, tym większe mamy szanse. Wynika to z masywności i skali zaangażowanych procesów fizycznych oraz ich bezwładności.



Raport WHO

World Health Organization. (2018). COP24 special report: Health and climate change »



Photo by christian-erfurt on Unsplash



Wiesz już o tym z lekcji 2 o punktach krytycznych w systemie klimatycznym i rozdziału 11 o sprzężeniach zwrotnych.

W skali planety kilkanaście czy kilkadziesiąt lat to mgnienie oka. Nigdy procesy na tę skalę (np. znacząca zmiana składu atmosfery) nie działały się tak szybko. Jednak w skali pojedynczego ludzkiego życia kilkanaście, kilkadziesiąt lat to bardzo długo. Ewolucyjna historia gatunku ludzkiego przygotowała nas do reagowania raczej na bezpośrednie i nagłe zagrożenia, takie jak atak wrogów czy pożar. Instynktowne reakcje walki lub ucieczki, jakie się wtedy włączają, pozwalają ludziom przetrwać i regulować napięcie. Natomiast przewlekłe mierzenie się z niewidzialnym i odległym zagrożeniem zmusza do długotrwałego mieszcznienia w sobie trudnych emocji. To zadanie, które grozi konsekwencjami psychologicznymi z powodu przewlekłego stresu. Może to prowadzić do powstania zaburzeń lękowych, depresji, uzależnień, utraty sensu życia itp.

Wśród chronicznych konsekwencji psychologicznych zmiany klimatu raport APA (2017) wymienia:

- lęk i depresję,
- uzależnienia,
- zwiększoną liczbę samobójstw,
- zwiększone ryzyko agresji i przemocy,
- nadwyrężenie relacji społecznych,
- przewlekły wielowymiarowy stres i jego konsekwencje,
- utratę osobiście ważnych miejsc,
- utratę autonomii i poczucia kontroli,
- utratę tożsamości osobistej i zawodowej,
- poczucie bezradności,
- strach, fatalizm, utratę sensu życia i lęk ekologiczny.



Więcej możesz przeczytać tu: 

Naturally green: Harnessing stone age psychological biases to foster environmental behavior »



Photo by danielle-macinnis on Unsplash

APA >
American
Psychological
Association

Konsekwencje globalnego ocieplenia dla zdrowia psychicznego (APA, 2014)

Ostre: Zniszczenia w infrastrukturze technicznej i społecznej, takiej jak przykładowo systemy zapewniania żywności, czy opieki zdrowotnej będą skutkować **ostrymi konsekwencjami dla dobrostanu psychologicznego.**

Przykładowo: Ostre zaburzenia związane ze stresem, PTSD, ...

Stopniowe: W kontraście do tego stopniowy wpływ zmiany klimatu, jak zmiany we wzorcach pogodowych, czy podniesienie się poziomu oceanów, będą powodować **głębokie i chroniczne konsekwencje psychologiczne.**

- Trauma i szok
- PTSD
- Wielowymiarowy stres
- Nadwyrężanie relacji społecznych
- Depresję
- Lęk
- Samobójstwa
- Nadużywanie substancji
- Agresję i przemoc
- Utratę osobiście ważnych miejsc
- Utratę autonomii i poczucia kontroli
- Utratę tożsamości osobistej i zawodowej
- Poczucie bezradności, strach
- Fatalizm, utratę sensu życia,
- Solastalię i lęk ekologiczny

KLUCZOWE JEST DZIAŁANIE NA POZIOMIE SPOŁECZNYM

Psychologowie (APA, 2014, 2017) zwracają także uwagę na konsekwencje nie tylko dla indywidualnych osób, ale i dla całych społeczności. Proponują, aby wysiłki przygotowujące odbywały się w dużej mierze na poziomie lokalnych społeczności i obejmowały, oprócz rozbudowanych systemów przygotowania na kryzys i zapewniania bezpieczeństwa, inwestowanie w więź społeczną. Wyzwania, jakie będzie stwarzać zmiana klimatu, przekraczają możliwości radzenia sobie z nimi pojedynczych osób. Dlatego kluczowe jest działanie na poziomie społecznym.

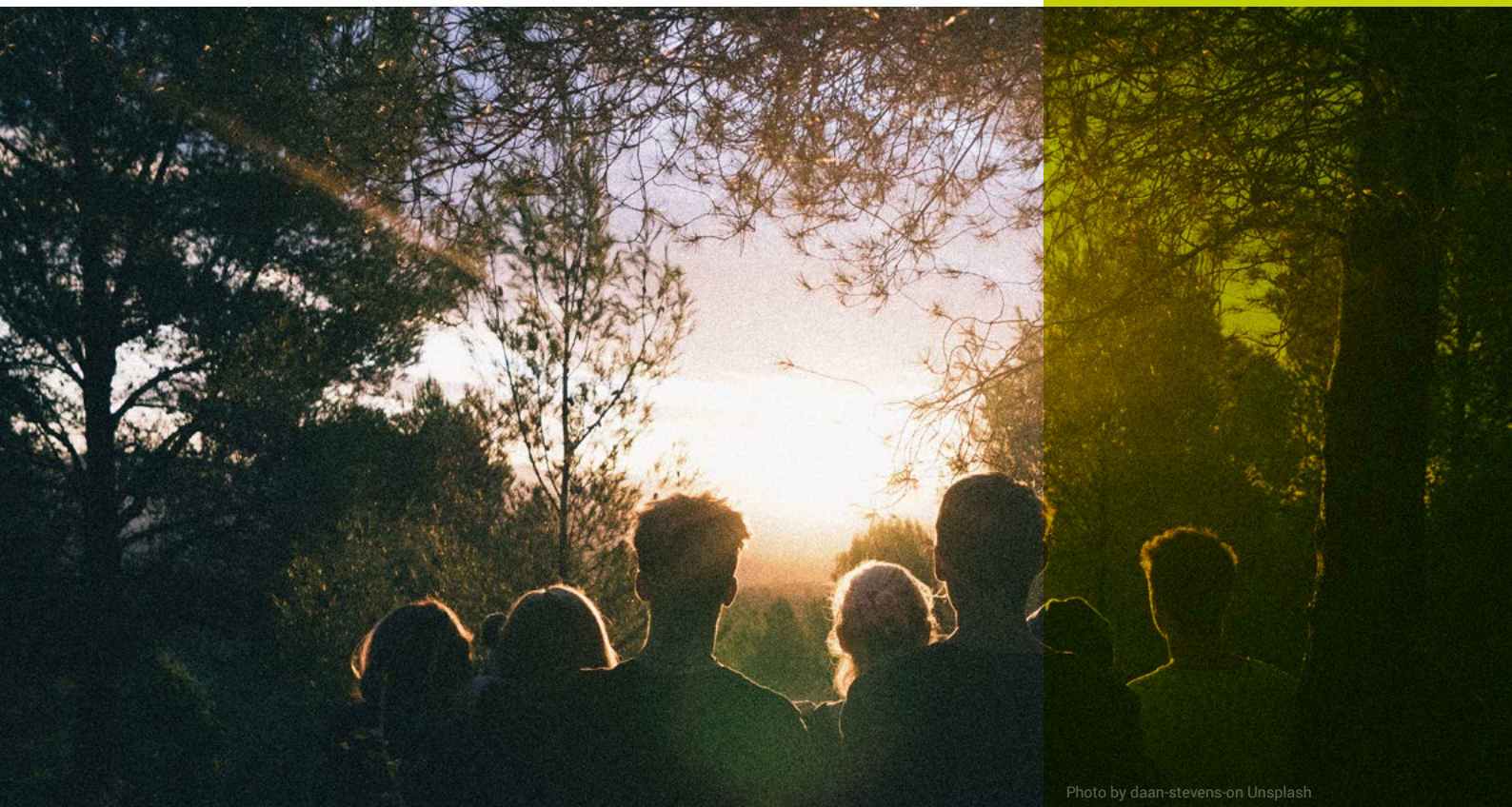


Photo by daan-stevens-on Unsplash

Pytanie do refleksji:

Adekwatna odpowiedź na zmianę klimatu musiałaby opierać się na umiejętności korzystania z rozumu i zdolności przewidywania, w tym skorzystania z prognoz długookresowych i wiedzy naukowców, a nie na instynktownych reakcjach typu walka czy ucieczka. Jakie okoliczności w procesach podejmowania decyzji sprzyjają racjonalności?

Jakie działania należałoby podjąć, aby wzmocnić indywidualne osoby w radzeniu sobie z przewlekłym stresem, tak aby prowadził on raczej do konstruktywnego działania, a nie do paraliżu i paniki?

Jak myślisz, dlaczego psychologowie zwracają uwagę nie tylko na indywidualne, ale raczej na zbiorowe, na poziomie małych grup i całych społeczności, sposoby przygotowywania się i reagowania na zagrożenia?

Co ludzie czują wobec zmiany klimatu?

W dalszej części lekcji chcemy poświęcić trochę uwagi emocjom, jakich powszechnie doświadczają ludzie wobec zmiany klimatu. Tych emocjonalnych reakcji jest bardzo wiele, bo każdy człowiek jest trochę inny i inaczej reaguje.

ZROZUMIENIE PEŁNEJ SKALI ZMIANY KLIMATU MOŻE BYĆ TRUDNE DO PRZYSWOJENIA EMOCJONALNEGO

Psychoterapeutka i lekarka zajmująca się zmianą klimatu, dr Janet Levis (2018), pisze, że należy uznać potencjał obciążenia emocjonalnego, jaki dla ludzi niesie ze sobą wiedza o zmianie klimatu. Zwraca ona uwagę, że jesteśmy razem, wszyscy mieszkańcy planety w zbiorowej sytuacji, której rozmiar potencjalnej katastrofy i jej konsekwencje przekraczają możliwości wyobraźni i są trudne do pełnego przyswojenia emocjonalnego.

Zaprzeczanie i dystansowanie się. W tej sytuacji nie dziwi, że być może najpowszechniejszą i w pewnym sensie zrozumiałą reakcją na tę wiedzę jest próba zaprzeczenia realności zmiany klimatu oraz różne formy dystansowania się od niej. Dystansowanie może opierać się na odsuwaniu tematu w miejscu i czasie (wyobrażamy sobie zmianę klimatu jako dziejącą się nie tutaj i nie teraz, swoisty problem na potem, pocieszamy się tym, że gdzie indziej będzie gorzej). Różne formy zaprzeczania, społecznie uwarunkowanego milczenia (to trudny temat – po co psuć wszystkim humor) są powszechne. O społecznych mechanizmach zaprzeczania zmianie klimatu i dystansowania się od nich wiesz już z 7 lekcji. Popularne, zwłaszcza w Internecie, są teorie spiskowe i grają one rolę w dystansowaniu się od tematu.

O bardzo ciekawym badaniu dotyczącym tego, jak rozmawianie o zmianie klimatu funkcjonuje w codzienności, opowiada (w języku angielskim) prof. Kari Norgaard.

Natomiast w tym materiale i sfilmowanym wywiadzie psychoterapeutka Sally Weintrobe omawia (w języku angielskim) subtelne formy dystansowania się od problemu, które dotyczą większości ludzi.



Artykuł dr Janet Lewis:

[In the room with climate anxiety »](#)



Może to wyjaśniać popularność wielu mitów na temat klimatu, o których wiesz z lekcji 6.



Obejrzyj film:

Bardzo polecamy ten wykład. Badania prof. Norgaard pokazują, jak temat zmiany klimatu funkcjonuje w przestrzeni międzyludzkiej i dlaczego tak trudno o tym rozmawiać na co dzień. »



[Obejrzyj film »](#)



Co jednak dzieje się z ludźmi, którzy są gotowi dopuścić do siebie trudną wiedzę o zmianie klimatu? Jakie są ich emocje i doświadczenia?

Kiedy 34 letniej Jadwidze urodziło się dziecko, świadomość problemu zmiany klimatu uderzyła w nią z całą mocą. Przez kilka miesięcy nie mogła spać po nocach, czytając artykuły naukowe na ten temat. Szukała w nich obietnicy, że będzie dobrze, i zaprzeczenia skali problemów, ale nie mogła znaleźć nic takiego. Zastanawia się, w jakim świecie przyjdzie żyć jej dziecku. 43-letni Janusz jest nauczycielem szkolnym i mieszka za miastem. Zawsze żył blisko przyrody. Od dziecka był z nią związany. Kiedy obserwuje zmiany klimatu na własne oczy, wyschnięty strumień, obumieranie drzew, brak motyli i innych owadów, napętnia go ogromnym smutkiem. Nie martwi się o siebie, ale o innych. Chorzy w szpitalach, dzieci, najstarsi – ich zmiany klimatu dotkną w pierwszym rzędzie. Stara się żyć skromnie, traktując to jako wybór etyczny, ale nie wierzy, żeby zainspirowało to wielu ludzi. Jadwiga i Janusz opowiedzieli swoje historie, ponieważ wzięli udział w badaniu jakościowym dotyczącym osób, które niepokoją się zmianą klimatu. Takich osób jest coraz więcej.



Photo by Markus Spiske on Unsplash

*Opowieści ludzi,
którzy się martwią*

SOLASTALGIA. Być może najbardziej filozoficzne z określeń klimatycznych emocji ukuł australijski filozof Glen Albrecht. Jest to pojęcie solastalgii. Albrecht stworzył neologizm łączący łacińskie słowo „*sōlācium*” oznaczające komfort i pocieszenie, z greckim rdzeniem „*-algia*”, oznaczającym ból lub chorobę. Stworzył nowe słowo, aby podkreślić, że sytuacja zmiany klimatu jest czymś wyjątkowym, bez precedensu w historii ludzkości. Dotychczasowe pojęcia przestały wystarczać do opisanie uczuć, które powoduje.

DEFINICJA SOLASTALGIA

Solastalgia to rodzaj tęsknoty i żałoby, wywołanej utratą takiego świata, jaki istniał, pociechy w niezmienności rytmu pór roku czy cykli przyrody. Szybkość, z jaką zachodzi globalne ocieplenie, sprawia, że znajome wzorce przestają istnieć, znika też poczucie bezpieczeństwa, jakie dawały. Albrecht pisze o tym, że chociaż większość mieszkańców Zachodu nie jest uchodźcami, to nie ruszając się z miejsca, a nawet żyjąc całe życie w jednym miejscu, ludzie potracili swoje dawne ojczyzny. Wiejska Anglia nie przypomina wiejskiej Anglii sprzed 30 lat, polska zima nie przypomina polskiej zimy z czasów dzieciństwa współczesnych czterdziestolatków. Dzieci urodzone w Polsce w ostatnich latach rzadko widzą śnieg. Solastalgia, wraz z różnorodnymi odcieniami poczucia straty i tęsknoty, może być najsilniejsza u osób blisko związanych z przyrodą, mieszkających na wsi. Opisano ją w społecznościach żyjących z ziemi, przykładowo rolników czy osób głęboko związanych ze swoją przyrodą i krajobrazem, jak społeczności Inuitów i inne rdzenne społeczności. Stosunkowo najtrudniej zmiany jest zauważyć ludziom żyjącym w miastach i w swojej codzienności wyalienowanym od przyrody.



Współczesny tekst wyrażający uczucia solastalgii, pisany z polskiej perspektywy:

Elegia dla śniegu i lodu »



Posłuchaj utworu Ludovico Einaudi – *Elegy for the Arctic*. Zagrany jest na specjalnie w tym celu przygotowanej platformie, na Oceanie Arktycznym. »

Silne emocje klimatyczne. W konfrontacji z uniwersalnym, realnym i egzystencjalnym zagrożeniem, jakim jest zmiana klimatu, u wielu osób pojawiają się równie silne, adekwatne, powszechne i „normalne” emocje.

Te, o których ludzie mówią najczęściej w kontekście zmiany klimatu, to: smutek, bezradność, strach i lęk, poczucie straty, żaloba, niepewność, dezorientacja, paraliż, apatia, przytłoczenie, panika, przewlekły stres, wściekłość i gniew, poczucie winy, poczucie krzywdy i inne.

KRAJOBRAZ EMOCJONALNY

W konfrontacji z uniwersalnym zagrożeniem pojawiają się silne, adekwatne, powszechne i „normalne” emocje. Takie jak:

- panika, strach i lęk,
- smutek, przytłoczenie, bezradność, brak nadziei,
- niepewność, dezorientacja, paraliż, apatia,
- poczucie winy i krzywdy,
- przewlekły stres, wściekłość i gniew, zmęczenie,
- poczucie straty, żaloba.

Pytanie do refleksji:

Czy są jakieś różnice we wzorach następowania po sobie pór roku, zjawisk atmosferycznych, w widywanych roślinach, owadach, zwierzętach, jakie zaobserwowałeś w miejscu, gdzie mieszkasz w skali swojego życia? W skali ostatnich kilku lat? Jak myślisz, czemu takich rzeczy nie zauważa się w codzienności?

Pytanie do refleksji:

Jak myślisz, jaką funkcję mogą pełnić emocje w kontekście zmiany klimatu?

FUNKCJE EMOCJI

Patrząc na emocje z perspektywy ich funkcji, warto podkreślić fakt, że wszystkie emocje mogą być zasadniczo adaptacyjne. Strach informuje o zagrożeniu, smutek sprzyja wycofaniu energii i daje czas na refleksję, a także zbliża do siebie ludzi. Złość może dawać energię do działania. Można sądzić, że przeżywanie trudnych emocji wobec zmiany klimatu jest w pewnym sensie zdrowsze niż inne reakcje, zwłaszcza te polegające na zaprzeczaniu, snuciu teorii spiskowych czy obwinianiu się nawzajem. Jako zdrowe rozumiemy tutaj te reakcje, których funkcja jest adaptacyjna. Ostatecznym probierzem adaptacyjności naszych reakcji wobec zmiany klimatu jest to, czy zbiorowo, na poziomie społecznym, przejdziemy do sensownego, przemyślanego działania. Trzymając się pewniej metafory, jeśli widzimy powódź zbliżającą się do naszej (globalnej) wioski, udawanie, że nie ma powodów do obaw, jest równie nieadaptacyjne, jak pozwolenie, by strach nas sparaliżował.

Istnieją różne reakcje na strach. Można zaprzeczać temu, że są powody do strachu, co jest krótkookresowo dobre, bo pozwala nam funkcjonować. Można także starać się coś zrobić za źródłem strachu, co jest długoterminowo dobre, bo pozwala w dłuższej perspektywie poradzić sobie z rzeczywistym zagrożeniem. Tym, co jest potrzebne wobec zmiany klimatu, jest to, aby społeczność wspólnie wypracowała możliwie dobre, oparte na wiedzy rozwiązania. To wymaga także rozmowy o przeżywanych emocjach i zbiorowego poradzenia sobie z uczuciami, jakie ta sytuacja powoduje.

LĘK I DZIAŁANIE

Ze względu na to, że zmiana klimatu ma naturę zagrożenia, a jednocześnie jest bardzo złożona i ogromna, łatwo o towarzyszące lękowi apatię i paraliż. Eksperci zgadzają się, że pomocne w emocjonalnym radzeniu sobie jest wszystko, co ułatwia przechodzenie od emocjonalnego paraliżu do przemyślanego, celowego działania. Podkreślają też rolę podtrzymywania nadziei. Skoro lęk często wywołuje reakcję zamrożenia („freezing response”), działanie – zwłaszcza wspólne działanie z innymi, w grupie bliskich osób, może pomóc w przełamaniu lęku także na poziomie neurologicznym (Gorman & Gorman, 2017).

Grupami najbardziej narażonymi na trudne emocje związane z klimatem są specjaliści, osoby dobrze poinformowane i narażone na natłok informacji (dziennikarze), osoby młode (młodzież i dzieci), kobiety, rodzice małych dzieci, osoby starsze i wszelkie grupy o słabszej pozycji w społeczeństwie.

MARTWIENIE SIĘ ZMIANĄ KLIMATU NIE JEST PATOLOGIA

W badaniu kwestionariuszowym pokazano, że korelacja pomiędzy częstym martwieniem się globalnym ociepleniem a skłonnością do generalnego patologicznego martwienia się jest bliska zeru (Verplanen & Roy, 2013). Innymi słowy, osoby, które niepokoją się zmianą klimatu, nie są przeciętnie bardziej lękowe czy neurotyczne niż reszta populacji. Martwienie się kwestiami ekologicznymi wiązało się natomiast z postawami i zachowaniami prośrodowiskowymi i ze strukturą osobowości zawierającą w sobie otwartość na doświadczenie.



Poczytaj:

Tutaj znajdują się świadectwa i listy od naukowców na ten temat »



Smutek klimatyczny. Cunsolo i Ellis (2018) opisali metaforycznie czasy, w których żyjemy, jako czas „wielkiej straty.” Dla rosnącej liczby osób coraz bardziej wplecione w codzienne doświadczenie staje się doświadczenie utraty ważnych miejsc, tożsamości, sposobów życia oraz antycypowane przyszłe straty. Dochodzi do tego także utrata pozytywnych oczekiwań co do przyszłości i perspektywa „powolnego” upadku ekosystemów. Epokę człowieka – antropocen (Steffen i in., 2015) – opisano także jako czas wielkiej samotności. Szóste wielkie masowe wymieranie gatunków (Ceballos, Ehrlich & Dirzo, 2017) to sytuacja, w której ludzie przyczyniają się do masowego zaniku różnorodności biologicznej, wymierania innych gatunków i w efekcie zostają na Ziemi coraz bardziej „sami”, a ich własna przyszłość jest niepewna. Smutek jest adekwatną reakcją na stratę. Doświadczenie smutku nie jest jednoznaczne z depresją ani patologią. Przeciwnie, patologią może być unikanie cierpienia za wszelką cenę (Horwitz & Wakefield, 2017). Doświadczenia smutku związanego z utratą świata przyrody i zmianą klimatu są ważne, bo są szansą na głębszą refleksję i ułatwienie społecznej rozmowy o tym problemie.

Ludzie mówią o depresji klimatycznej. Opowieści osób, które problem zmiany klimatu dotyka głęboko, często odnoszą się do – mówiąc ich własnymi słowami – „depresji klimatycznej”. Takiemu stanowi może towarzyszyć utrata sensu życia, nadziei i motywacji do robienia czegokolwiek, irytacja i agresja, bezsenność, wycofanie, unikanie relacji społecznych, nienawiść, życzenia śmierci, ideacje samobójcze, wyobrażeniowość nasycona śmiercią, niewychodzenie z domu, utrata zainteresowań itd. Trzeba pamiętać, że depresja o nasileniu klinicznym, podobnie jak lęk uniemożliwiający funkcjonowanie, jest chorobą i dobrym powodem, żeby poszukać pomocy lekarza oraz jeśli to możliwe – psychoterapii.

Depresja klimatyczna nie jest jednak osobną diagnozą. Nie postuluje się wprowadzenia takiej jednostki chorobowej. Podobnie nie ma depresji „po rozstaniu” czy „po utracie pracy” jako osobnych kategorii diagnostycznych, chociaż liczne straty życiowe uprawdopodobniają zachorowanie na depresję. Zamiast tego ostry i przewlekły stres związany ze zmianą klimatu może na zasadzie reakcji i przewlekłego obciążenia prowadzić i do depresji, i do innych zaburzeń (ich listę podała APA, 2014).

Wiele osób mówiących o depresji klimatycznej nie ma jednak na myśli depresji w sensie medycznym jako choroby. Zamiast tego w języku potocznym mówi się o „depresji”, używając tego słowa jako metafory dla stanów intensywnego cierpienia, załamania się czy braku nadziei. W tym znaczeniu na to, co ludzie nazywają depresją klimatyczną, można popatrzeć raczej jako na kryzys egzystencjalny spowodowany poważnym i realnym zagrożeniem cywilizacyjnym, którego skala i znaczenie dopiero zaczynają do ludzi docierać.

Tak jak opisano w części dotyczącej smutku, jest w przeżywaniu emocji klimatycznych pewna adekwatność i odwaga. Być może nawet te osoby, bardziej niż inne, reagują na rzeczywistość taką, jaka ona jest i są swoistymi sygnalistami. Pokazują społeczeństwu coś ważnego, co dzieje się realnie i wymaga uwagi.



Właśnie dlatego w psychologii klinicznej czy psychoterapii niekoniecznie postuluje się tworzenie specjalnych kategorii diagnostycznych dla konsekwencji stresu związanego ze zmianą klimatu. Niosłoby to bowiem ryzyko patologizowania i społecznego unieważniania reakcji emocjonalnych na realny kryzys (Horwitz & Wakefield, 2017).

Żałoba. Dla zrozumienia emocji związanych ze zmianą klimatu pojęcie żałoby rodzi w pewnym sensie ciekawsze implikacje niż pojęcie depresji. Jest tak dlatego, że żałoba w odróżnieniu od depresji nie konotuje zaburzenia, ale normalność i procesualność stawiania czoła trudnościom.

Żałoba jest reakcją na stratę, znaną w wielu kulturach, różnorodną w wyrazie i powszechną. Okres żałoby jest okresem przejścia, emocjonalnego, mentalnego, praktycznego, czasem reorientacji. Uczymy się żyć od nowa w kontekście straty. Rzadko mówi się o stracie, odnosząc się do świata przyrodniczego czy naturalnego. Jest to nieuznana, nierozpoznana żałoba (Doka, 1989). Zdaniem współczesnych autorów piszących o żałobie w kontekście zmiany klimatu (Butler, 2004; Head, 2016) – taka żałoba ma duży potencjał łączący ludzi, prowadzi do uznania połączenia, współzależności, do przeżycia wspólnej podatności na zranienie. Zatem może być transformacyjna społecznie, pomagać ludziom współpracować ze sobą. W kontekście zmiany klimatu to właśnie skłonność ludzi do współpracy lub jej brak mogą okazać się kluczowym czynnikiem decydującym o powodzeniu zarówno mitygacji, jak i adaptacji.



Wiesz o tym z lekcji 5
o problemie dóbr wspólnych.



Strategie radzenia sobie ze stresem

GENERALNE REKOMENDACJE W RADZENIU SOBIE Z PRZEWLEKŁYM STRESEM

Istnieją generalne rekomendacje, jakich można udzielić osobom zmagającym się z przewlekłym stresem. Nie musi to dotyczyć zmiany klimatu, sprawdzi się także w stresie spowodowanym nauką, pracą, chorobą czy innymi sytuacjami życiowymi.

Poniższe rekomendacje zostały opracowane przez Australijskie Towarzystwo Psychologiczne (2019), tak aby móc z nich skorzystać w kontekście stresu spowodowanego zmianą klimatu. Australia już teraz zмага się z poważnymi konsekwencjami zmiany klimatu, co dotyka wielu ludzi.

ZACHOWAJ AKTYWNĄ POSTAWĘ

Długotrwała bierność w stosunku do spraw, które są dla nas ważne, może pozbawiać siły i poczucia sprawczości. Nawet w sprawach, na które nie mamy całkowitego wpływu, utrzymywanie aktywnej postawy i podejmowanie małych kroków sprzyja dobrostanowi psychologicznemu. Dotyczy to w równej mierze zarówno codziennych stresorów, jak trudny egzamin czy choroba bliskiej osoby, jak i makro wyzwań społecznych, jak zmiana klimatu.

RÓB PRZERWY I PLANUJ ODPOCZYNEK

Robienie sobie celowych przerw od myślenia o trudnych problemach jest kolejną ważną strategią. Bycie wystawionym na ciągły napływ negatywnych informacji, czy to w mediach, czy mediach społecznościowych, nie rozwiązuje żadnych problemów, a bardzo męczy odbiorcę. Świadome robienie sobie przerw od zajmowania się czymś ważnym jest inne od wyparcia czy trwałego unikania problemu. Pozwala na aktywne zarządzanie swoimi zasobami czasu, sił i energii.

POSIADAJ ZDROWE RUTYNY

Rutyny często sprawiają, że ludzie kwitną. Planowanie aktywności i podejmowanie decyzji, co, kiedy, jak i czy w ogóle robimy, jest obciążające. Rutyny oszczędzają energię przy podejmowaniu drobnych decyzji, zachowując ją na działanie. Rutyny mogą dotyczyć sposobów pracy, dbania o zdrowe jedzenie, sen, wysiłek fizyczny, spędzania czasu w przyrodzie, z dziećmi, dbania o relacje. W przewlekłym stresie rola nawyków jest szczególnie ważna.

KORZYSTAJ Z SIŁY DOBRYCH EMOCJI

Pozytywne doświadczenia są bardzo ważne w motywowaniu siebie i byciu inspiracją dla innych. Kiedy doświadczamy pozytywnych emocji, większe jest prawdopodobieństwo, że będziemy działać skutecznie. Badacze pokazali,



Możesz przeczytać

Pełny tekst rekomendacji i inne materiały możesz znaleźć w języku angielskim w dołączonych linkach. »



Photo by svyatoslav-romanov/Unsplash

że ludzie, którzy doświadczają pozytywnych emocji, są bardziej chętni, by konfrontować się wprost z zagrożeniami, znajdują bardziej twórcze i kreatywne rozwiązania problemów, są bardziej motywujący dla innych itp. Nawet w trudnych sytuacjach często można znaleźć przestrzeń do spontaniczności, żartów, zabawy by kultywować pozytywne emocje. Potencjalne rozwiązania makro problemów społecznych, takich jak zmiana klimatu, mają bardzo dużo dobrych stron – warto ich poszukać i o nich mówić.

SKONCENTRUJ SIĘ TYLKO NA KILKU RZECZACH NA RAZ

Nikt nie może zrobić wszystkiego. Warto wybrać to, co chcesz i możesz zrobić, i koncentrować na tym energię, zamiast starać się zrobić wszystko na raz. Świadoma koncentracja na jednym lub kilku obszarach oszczędza siły i chroni przed przeciążeniem.

KORZYSTAJ ZE WSPARCIA SPOŁECZNEGO

Dbaj o dobre relacje z osobami, które rozumieją twoje troski i mogą cię wspierać. Żadna inna rzecz nie ma tak silnie udowodnionego działania w radzeniu sobie z długotrwałym stresem, jak wsparcie społeczne (Taylor, 2011). Inni ludzie mogą być źródłem informacji, wzorów radzenia sobie, mogą towarzyszyć, wspierać, dostarczać okazji do wyrażania emocji, pomagać nabierać dystansu. Świadomie spędzaj czas ze wspierającymi osobami i we wspierającym otoczeniu, poszukaj ludzi, którzy dzielą twoje troski lub wartości.

POZAWALAJ SOBIE NA AKCEPTOWANIE I WYRAŻANIE WSZYSTKICH EMOCJI

Spróbuj nie oceniać swoich emocji, ale pozwól im być. Obserwuj, jak pojawiają się i znikają, spróbuj je nazwać. Dbaj o swoje ciało i bądź uważny na wszystko, co się pojawia. Relaksacja, medytacja czy zwykłe wygadanie się przyjacielowi potrafią pomóc. W rozmowach ludzie często odkrywają, że inni czują podobnie i uczą się nowych perspektyw podchodzenia do problemów.

NIE OCENIAJ ZBYT SUROWO (SIEBIE I INNYCH)

W kontekście klimatu łatwo o poczucie winy i irytację – w końcu nikt nie robi wystarczająco wiele, ani my, ani inni. Jest to podobne do innych trudnych sytuacji, w chorobie dziecka czy bliskiej osoby wiele osób także obwinia się, że nie uczyniło wystarczająco wiele. Warto unikać ocen i nadmiernego krytycyzmu i rygoryzmu względem siebie i innych.

RÓWNOWAŻ I PRZEPLATAJ DZIAŁANIE REFLEKSJĄ

Pozwoli to na rozróżnienie rzeczy ważnych od nieważnych, potrzebnych od niepotrzebnych, dzielenie działania na małe kroki i równowagę. Małe kroki i ich docenianie są bardzo ważne w działaniu na długi dystans i w przewlekłych sytuacjach obciążenia.

Refleksja pomaga unikać także pułapek i błędów poznawczych, takich jak myślenie czarno-białe i w kategoriach „wszystko albo nic”. W odniesieniu do zmiany klimatu jest to szczególnie ważne.



PIELĘGNUJ NADZIEJĘ

Nadzieja w kontekście nieznanej przyszłości może być różnie rozumiana, ale jest często ludziom niezbędnie potrzebna. Postawa nadziei może łączyć się z wyznawanymi wartościami, z odwagą i pielęgnowaniem konstruktywnej postawy wobec samego siebie i innych.



Nadzieja nie oznacza przekonania, że coś skończy się dobrze,
– lecz pewność, że warto coś robić,
bez względu na to, jakie będą rezultaty.”

Vaclav Havel

DBAJ O ODPOCZYNEK MENTALNY I KORZYSTAJ Z KONTAKTU Z NATURĄ

Ludzie w trudnych sytuacjach są zdolni do wytrzymania nawet wielkiego wysiłku, skupienia, skoncentrowanej uwagi (Kaplan & Berman, 2010). Jednak osoby, które są bardzo zmęczone mentalnie, na przykład przez długotrwałe utrzymywanie skoncentrowanej uwagi, często doświadczają wyczerpywania zasobów energii czy siły woli. W takim przypadku warto zadbać o uzupełnienie zasobów uwagi (energii mentalnej) poprzez czynności i przebywanie w środowisku, które wspiera regenerację psychiczną. Może być to praca w ogrodzie, spacer po lesie i generalnie korzystanie z kontaktu z naturą, patrzenie się na obiekty i miejsca, które są przyjemne i nie wymagają dużo uwagi, jak patrzenie na chmury, w ogień, bycie w przyrodzie czy kontakt ze zwierzętami. Relaks, zabawa, sport mogą pomóc odbudować się mentalnie. Człowiek jest częścią przyrody i naturalnego świata. Można zatem rozumieć, że dbanie o dobrostan całego złożonego świata naturalnego musi i może zawierać także aktywne dbanie o samego siebie. Nie da się być konstruktywnym dla otoczenia, będąc jednocześnie destruktywnym dla samego siebie.



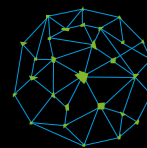
Photo by monica-leonardi-Unsplash

RELACJA CZŁOWIEK-PRZYRODA

W ramach tak zwanej psychologii ekologicznej (Roszak, 1992) postawiono tezę, że człowieka i przyrodę łączy głęboka, ale częściowo nieświadoma więź wyływająca z naszej przeszłości, korzeni i życia naszych przodków. Człowiek jest częścią przyrody i jest z nią powiązany na wiele sposobów siecią współzależności. Szkodząc przyrodzie, szkodzi samemu sobie. To poczucie więzi zostało jednak stłumione przez nowoczesną cywilizację, czego skutkiem jest degradacja przyrody. Zastanów się, czy zgadzasz się z tą myślą?

Podobna idea nosi w psychologii nazwę **hipotezy biofilii**. Mówi ona o tym, że ludzie mają naturalną tendencję do szukania i koncentrowania się na procesach związanych z życiem oraz instynktowne, wrodzone poczucie bliskości z naturą. Dotyczy to zwłaszcza jej niezagrażających wymiarów (większość osób preferuje i odbiera jako przyjemne i uspokajające miejsca, które zawierają zieleni i wodę). Mamy też poczucie pokrewieństwa w stosunku do wielu gatunków zwierząt (Wilson, 2017). Dowody na dobroczynny wpływ przyrody obejmują redukcje stresu psychicznego, odbudowywanie zasobów uwagi, przyjemność czy skuteczność programów terapeutycznych z wykorzystaniem przyrody (Scott, Amel, Koger & Manning, 2015).





**KLIMATYCZNE
ABC**

**ZBIGNIEW BOHDANOWICZ
PAWEŁ GAJDA
JAKUB JĘDRĄK
ALEKSANDRA KARDAŚ
SZYMON MALINOWSKI
ADAM RAJEWSKI**

Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu?

Scenariusze ograniczania emisji i energetyka

Ostatnie rozdziały klimatycznego ABC poświęcone są działaniom mogącym ograniczyć zmianę klimatu. Mówimy też o działaniach pomagających w adaptacji, jako że mitygacja zmiany klimatu (jej ograniczanie) i adaptacja (przystosowywanie się do niej) często są powiązane. Istnieją jednak granice przystosowania, dlatego ostatecznie przystosowanie się do zmiany bez jej ograniczenia nie jest możliwe.

W pierwszej części rozdziału podsumowujemy wnioski ze „Specjalnego raportu Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu o ociepleniu o 1,5°C”, który omawia między innymi scenariusze emisji gazów cieplarnianych, które pozwoliłyby na zatrzymanie globalnego ocieplenia na uzgodnionym przez państwa świata poziomie. Im później rozpocznie się redukcja emisji, tym szybsze musi być jej tempo. Obecnie czasu jest już bardzo mało.

Żeby ograniczenie zmiany klimatu się powiodło, konieczne będą zmiany w wielu aspektach funkcjonowania społeczeństwa i gospodarki. Dlatego w następnym kroku mówimy o energetyce, która jest kluczowym (choć nie jedynym) sektorem wymagającym całkowitej przemiany. Potrzeba transformacji energetycznej jest pilna, ale jak zobaczysz, nie jest ona sprawą prostą i wymaga planowania. Pod koniec tego rozdziału mówimy też o ważnym w Polsce, często mylonym ze zmianą klimatu, problemie jakości powietrza, czyli smogu. Wiele rozwiązań problemu smogu nie redukuje niestety zmiany klimatu, gdyż nie obniża wystarczająco emisji gazów cieplarnianych.

mitygacja zmiany klimatu

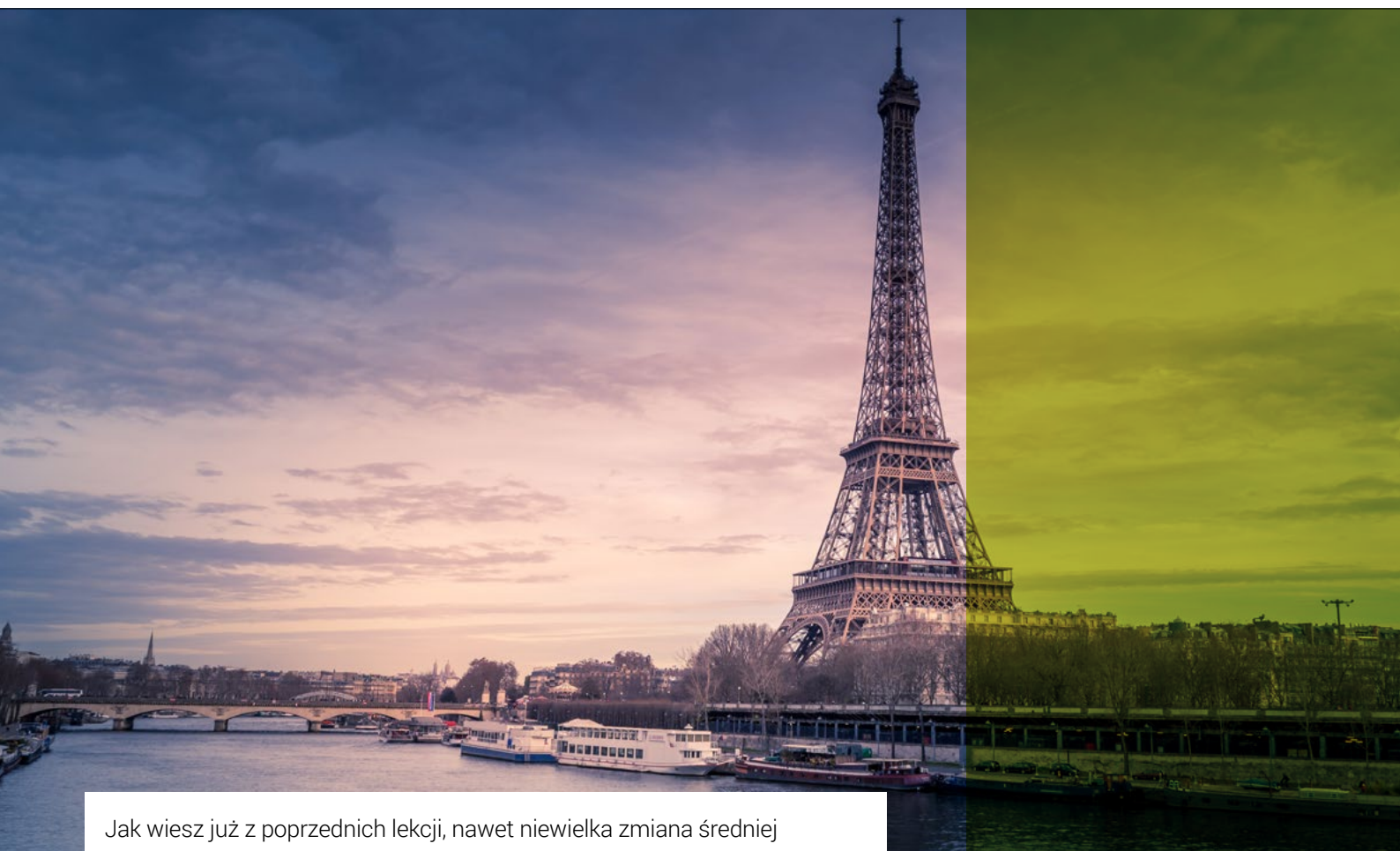
– wszelkie działania na rzecz ograniczenia lub zatrzymania wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi

adaptacja do zmiany klimatu

– wszelkie działania mające na celu przystosowanie społeczeństwa i infrastruktury do skutków zmiany klimatu oraz minimalizację negatywnych konsekwencji tego zjawiska

Najważniejsze wnioski z raportu IPCC o ociepleniu o 1,5°C

Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu opisał działania, które pozwoliłyby na zatrzymanie ocieplania się klimatu na poziomie 1,5°C względem epoki przedprzemysłowej. Wymagają one drastycznych zmian w gospodarce, m.in. szybkiego wyzerowania antropogenicznych emisji CO₂.



Jak wiesz już z poprzednich lekcji, nawet niewielka zmiana średniej temperatury powierzchni Ziemi przynosi wiele zmian w funkcjonowaniu przyrody oraz życiu człowieka. Nie jest możliwe jednoznaczne określenie „bezpiecznego” zakresu zmian. Poszczególne zjawiska stają się poważne, zagrażające systemom naturalnym i antropogenicznym lub nieodwracalne w różnych momentach. Koordynacja działań ludzkości mających na celu ograniczenie zmiany klimatu wymaga jednak ustalenia konkretnych celów, do których można byłoby dążyć i których realizację można by weryfikować. Taki cel zarysowany został w uchwalonym w roku 2015 podczas konferencji Narodów Zjednoczonych **Porozumieniu paryskim**:

STRONY NINIEJSZEGO POROZUMIENIA,
BĘDĄC Stronami Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych
w sprawie zmian klimatu (...)

UZNAJĄC potrzebę skutecznego i coraz szerszego reagowania na pilne
zagrożenie powodowane przez zmiany klimatu na podstawie najlepszej
dostępnej wiedzy naukowej,

UZNAJĄC RÓWNIEŻ specyficzne potrzeby i specjalne uwarunkowania Stron
będących państwami rozwijającymi się, zwłaszcza tych, które są szczególnie
narażone na negatywne skutki zmian klimatu, przewidziane w Konwencji, (...)

PRYZNAJĄC, że zmiany klimatu stanowią wspólny problem ludzkości (...)

UZGODNIŁY, CO NASTĘPUJE: (...)

Wzmocniając wdrażanie Konwencji, w tym jej celu, niniejsze Porozumienie
dąży do intensyfikacji globalnej odpowiedzi na zagrożenie związane ze zmia-
nami klimatu, w kontekście zrównoważonego rozwoju i wysiłków na rzecz
likwidacji ubóstwa, między innymi poprzez:

- a) ograniczenie wzrostu średniej temperatury globalnej do poziomu znacz-
nie niższego niż 2°C powyżej poziomu przedindustrialnego oraz podej-
mowanie wysiłków mających na celu ograniczenie wzrostu temperatury
do 1,5°C powyżej poziomu przedindustrialnego, uznając, że to znacząco
zmniejszy ryzyka związane ze zmianami klimatu i ich skutki;
- b) zwiększenie zdolności do adaptacji do negatywnych skutków zmian
klimatu oraz wspieranie odporności na zmiany klimatu i rozwoju zwią-
zanego z niską emisją gazów cieplarnianych w sposób niezagrażający
produkcji żywności; oraz
- c) zapewnienie spójności przepływów finansowych ze ścieżką prowadzą-
cą do niskiego poziomu emisji gazów cieplarnianych i rozwoju odporne-
go na zmiany klimatu.

Źródło: Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej »

Jak widzisz, decydenci zdecydowali się na określenie konkretnego progu, które-
go nie powinna według nich przekroczyć średnia temperatura powierzchni Zie-
mi. Początkowo miał on wynosić 2°C, zwrócono jednak uwagę, że taki próg jest
nieakceptowalny dla licznych krajów wyspiarskich i nisko położonych, których
teren zostałyby w takim przypadku zajęte w wyniku wzrostu poziomu morza.



CZY WIESZ, ŻE ?

👉 Ograniczanie ocieplania
klimatu nazywamy też
czasem z angielskiego
mitygacją zmiany klimatu.

Po podpisaniu porozumienia decydenci zwrócili się do Międzyrządowego Zespołu do spraw Zmiany Klimatu (IPCC), ciała doradczego ONZ, o przygotowanie raportu, w którym rozstrzygnięto by między innymi:

- względem jakiego okresu referencyjnego należy obliczać odchylenie średniej temperatury powierzchni Ziemi,
- czy różnica pomiędzy światem cieplejszym o 1,5°C oraz 2°C od średniej przedindustrialnej jest istotna z punktu widzenia bezpieczeństwa przyrody i ludzkości,
- czy realizacja celu przedstawionego w Porozumieniu jest możliwa,
- jakie działania należałoby podjąć, by tego dokonać.

Ze swojej strony naukowcy postanowili dodatkowo określić, na ile działania podejmowane w celu ograniczania zmiany klimatu sprzyjają jednocześnie (lub zagrażają) realizacji celów zrównoważonego rozwoju ONZ (takich jak ograniczanie głodu, ubóstwa czy zmniejszenie nierówności).

Po przeanalizowaniu dostępnych wyników badań, naukowcy przedstawili w 2018 **„Specjalny raport Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu o ociepleniu o 1,5°C”**. Dowiedzieliśmy się z niego, że:

- okresem referencyjnym, w którym panowały warunki zbliżone jeszcze do przedindustrialnych i dla którego mamy wystarczająco dużo danych, są lata 1850–1900,
- wzrost średniej temperatury o 2°C względem tego okresu oznacza dużo poważniejsze konsekwencje dla systemów naturalnych i antropogenicznych niż wzrost o 1,5°C, istotnie zwiększa ryzyko przekroczenia punktów krytycznych dla wielu zjawisk,
- ograniczenie wzrostu temperatury do tego poziomu było jeszcze realne, biorąc pod uwagę stan systemu klimatycznego (choć, oczywiście, trudne technicznie i organizacyjnie).

W raporcie przedstawiono także scenariusze zmian w gospodarce, które pozwoliłyby na zatrzymanie ocieplania się klimatu poniżej progów 1,5°C i 2°C lub ewentualnie powrót poniżej tych progów po ich krótkotrwałym przekroczeniu. Jak już wiesz z poprzednich lekcji, system klimatyczny jest bardzo skomplikowany i obejmuje wiele wzajemnie powiązanych zjawisk, także mających charakter sprzężeń zwrotnych. Dlatego nie jest możliwe określenie ze stu-procentową pewnością, jakie będą dokładne konsekwencje poszczególnych scenariuszy. W raporcie omówiono więc te, które pozwoliłyby na realizację wspomnianych wyżej celów z prawdopodobieństwem przynajmniej 50% oraz przynajmniej 66%.

Aby z prawdopodobieństwem co najmniej 50% udało się nie przekroczyć progu 1,5°C lub przekroczyć go tylko krótkoterminowo, globalne antropogeniczne emisje dwutlenku węgla muszą w roku 2050±5 spaść wypadkowo (netto) do zera. W drugiej połowie XXI wieku antropogeniczne emisje CO₂ powinny natomiast stać się ujemne. Oznacza to konieczność wdrożenia na dużą skalę rozwiązań technicznych oraz opartych na wspomaganiu procesów naturalnych, które usuwałyby dwutlenek węgla z atmosfery. Spadkowi emisji dwutlenku węgla towarzyszyć musiałyby także spadki emisji innych gazów cieplarnianych oraz sadzy.

Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu w skrócie nazywamy **IPCC**, od angielskiego *Intergovernmental Panel on Climate Change*.



O celach zrównoważonego rozwoju ONZ przeczytasz na specjalnej stronie ».



„Specjalny raport Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu o ociepleniu o 1,5°C” »

A streszczenie w języku polskim znajdziesz tu »

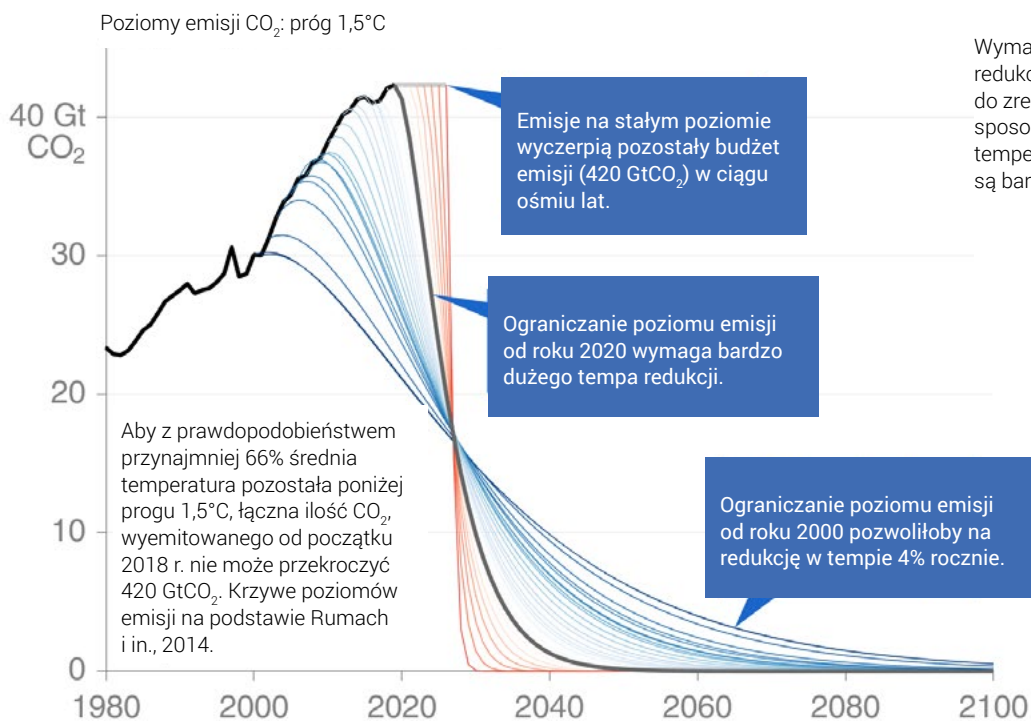
EMISJE ANTROPOGENICZNE NETTO (WYPADKOWE) – różnica pomiędzy ilością substancji emitowanej a usuwanej z atmosfery w wyniku działalności człowieka

DEFINICJA
EMISJE
ANTROPOGENICZNE
NETTO

UJEMNE EMISJE – potoczne pojęcie oznaczające usuwanie substancji z atmosfery

DEFINICJA
UJEMNE EMISJE

Im później rozpocznie się redukcja emisji, tym szybsze musi być jej tempo (patrz rysunki poniżej). Według szacunków IPCC, aby z prawdopodobieństwem przynajmniej 66% nie przekroczyć progu 1,5°C, od początku roku 2020 możemy w sumie wyemitować już tylko niecałe 350 GtCO₂ (lub mniej, jeśli nastąpią istotne emisje ze źródeł naturalnych np. wieloletniej zmarzliny, więcej szczegółów w raporcie). Utrzymując obecny poziom emisji (ponad 40 GtCO₂ rocznie), próg 1,5°C przekroczymy już w latach 2030–2052 (niestety, jest prawdopodobne, że będzie to raczej na początku tego okresu, Xu i in., 2018).

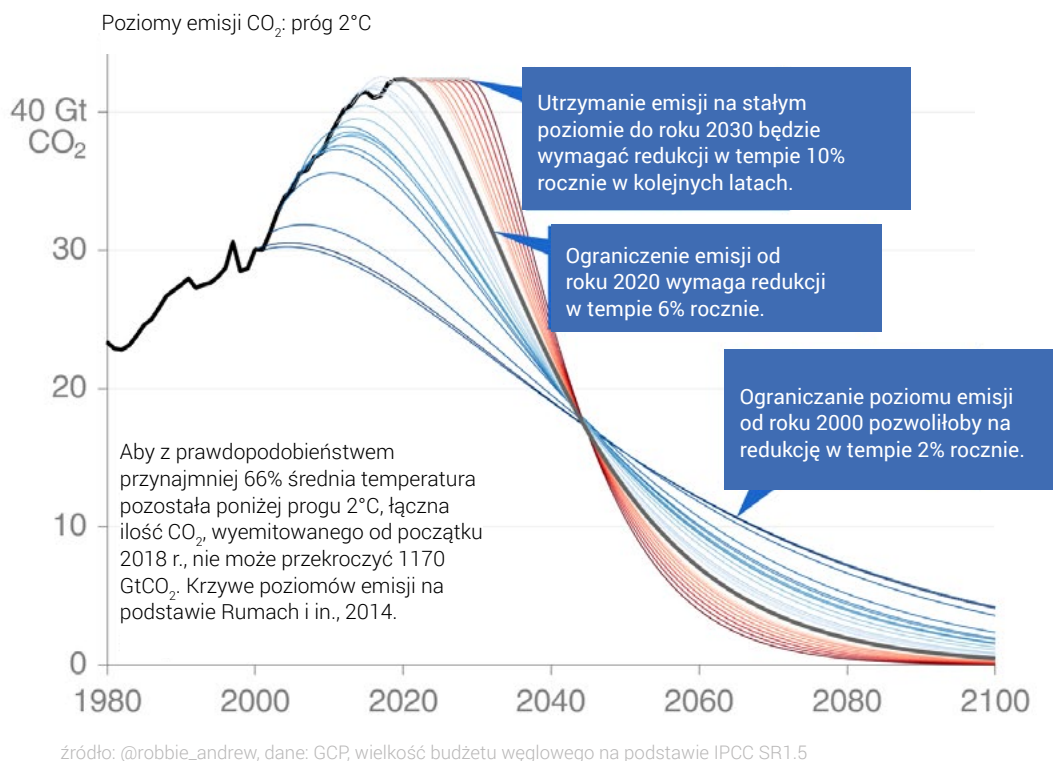


Wymagane obecnie tempo redukcji emisji jest już niemożliwe do zrealizowania. Jedynym sposobem, aby utrzymać temperaturę poniżej progu 1,5°C są bardzo duże „ujemne emisje”.

źródło: @robbie_andrew, dane: GCP, wielkość budżetu węglowego na podstawie IPCC SR1.5

Rysunek 1: Scenariusze ograniczania poziomu emisji pozwalające na zatrzymanie wzrostu temperatury na progu 1,5°C z prawdopodobieństwem powyżej 66%. Linia czarna to scenariusz, w którym redukcje emisji zaczynają się w roku 2020, linie niebieskie to niezrealizowane już scenariusze, w których redukcje emisji zaczęłyby się wcześniej, czerwone – scenariusze, w których redukcje zaczynają się później.

Źródło grafiki: Robbie Andrew. »



Rysunek 2: Scenariusz ograniczania poziomu emisji pozwalający na zatrzymanie wzrostu temperatury na progu 2°C z prawdopodobieństwem powyżej 66%. Linia czarna to scenariusz, w którym redukcje emisji zaczynają się w roku 2020, linie niebieskie to niezrealizowane już scenariusze, w których redukcje emisji zaczęłyby się wcześniej, czerwone – scenariusze, w których redukcje zaczną się później.

Źródło grafiki: Robbie Andrew. »

INŻYNIERIA KLIMATYCZNA (GEOINŻYNIERIA)

Inżynieria klimatyczna to opracowywanie rozwiązań, które mogłyby pomóc nam świadomie wpływać na klimat poprzez:

- **ograniczanie ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi** (metody SRM – Solar Radiation Management),
- **wychwytywaniu dwutlenku węgla z powietrza** – zarówno przez odpowiednie instalacje, jak i wspomaganie naturalnych procesów, np. wietrzenia skał lub wzrostu glonów (metody CDR – Carbon Dioxide Removal).

Większość tego typu rozwiązań nie jest na razie gotowa do zastosowania na masową skalę – wymagają dokładnego zbadania skutków ich stosowania lub rozwoju technologii, tak by były technicznie wykonalne i ekonomicznie opłacalne.

Jak podkreślono w raporcie IPCC, metody SRM niosą za sobą poważne zagrożenia dla ludzi i środowiska, nie rozwiązują trwale problemów związanych ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych (takich jak zakwaszanie oceanów) i wiążą się z poważnymi problemami organizacyjnymi i etycznymi. Z tego powodu nie uwzględniono ich w scenariuszach działań pozwalających na ograniczenie zmiany klimatu.

Z kolei wykorzystanie metod CDR jest obecnie nieodzowne do realizacji celów Porozumienia paryskiego (patrz wykres powyżej).

Jak można przeczytać w raporcie, uzyskanie odpowiednio daleko idących cięć w emisjach gazów cieplarnianych wymagać będzie zaawansowanych zmian w gospodarce i na wszystkich poziomach organizacji życia społecznego – od zmian na poziomie państw i wielkich przedsiębiorstw po zmiany w stylu życia poszczególnych obywateli. Do najważniejszych należeć będą:

- **Dekarbonizacja energetyki** – jak wiesz już z lekcji 4, jest to główny sektor gospodarki odpowiedzialny za emisje CO₂. W grę wchodzi ewentualnie produkcja kilku procent potrzebnej energii z wykorzystaniem gazu, ale pod warunkiem wdrożenia systemów wychwytu CO₂ ze spalin produkowanych przez elektrownie),
- **Obniżenie emisji CO₂ z przemysłu o 75–90%** – m.in. dzięki poprawie efektywności energetycznej procesów, użyciu wodoru, elektryfikacji, wychwytwi CO₂ ze spalin,
- **Poprawa efektywności energetycznej i elektryfikacja budynków i infrastruktury miejskiej,**
- **Zamiana do 8 mln km² pastwisk i do 5 mln km² gruntów rolnych na 1–7 mln km² upraw energetycznych i do 10 mln km² lasów (do 2050).**

Wymienione w ostatnim punkcie zmiany użytkowania terenu to jeden ze sposobów na uzyskanie niezbędnych ujemnych emisji CO₂.

ZAPAMIĘTAJ!

Zmiany w użytkowaniu terenu to jeden z elementów scenariuszy działań pozwalających na ograniczenie zmiany klimatu. Rozwiązania z tej dziedziny nie zastąpią rezygnacji z wykorzystania paliw kopalnych.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

W kolejnych rozdziałach przeczytasz o możliwych scenariuszach rozwoju energetyki oraz o tym, jaką rolę w ograniczaniu zmiany klimatu mogą odegrać gospodarka leśna, rolnictwo czy ochrona i renaturyzacja ekosystemów. Przedstawimy też instrumenty ekonomiczne sprzyjające dekarbonizacji i przystosowywaniu się ludzkości do życia w nowych warunkach klimatycznych. Wszystko są to elementy układanki, która mogłaby pomóc spełnić postanowienia Porozumienia paryskiego.

Niestety, jak możesz pamiętać z lekcji piątej, dotychczasowe działania poszczególnych państw (wdrożone i planowane) nie są wystarczające do realizacji scenariuszy opisanych przez IPCC. Według prognoz wystarczą one do ograniczenia ocieplenia do ponad 3°, a nie 1,5° lub 2° względem epoki przedprzemysłowej. Z każdym rokiem różnica pomiędzy faktycznymi emisjami a tym, ile powinny one wynosić, gdybyśmy chcieli wypełnić postanowienia Porozumienia paryskiego, rośnie (UNEP, 2019).

Dekarbonizacja – rezygnacja ze spalania paliw kopalnych.

Photo by Dave on Unsplash

Transformacja sektora energetycznego

Energetyka to jeden z kluczowych sektorów gospodarki, który równocześnie jest jednym z głównych źródeł emisji dwutlenku węgla. Z tego powodu musi on przejść znaczącą transformację. Takie zmiany są deklarowane i podejmowane są próby dekarbonizacji sektora energetycznego. Do tej pory jednak nie przyniosły one redukcji emisji w skali świata, a tylko pewne spowolnienie tempa ich wzrostu.

ZMIANY W ENERGETYCE – O CZYM TRZEBA PAMIĘTAĆ?

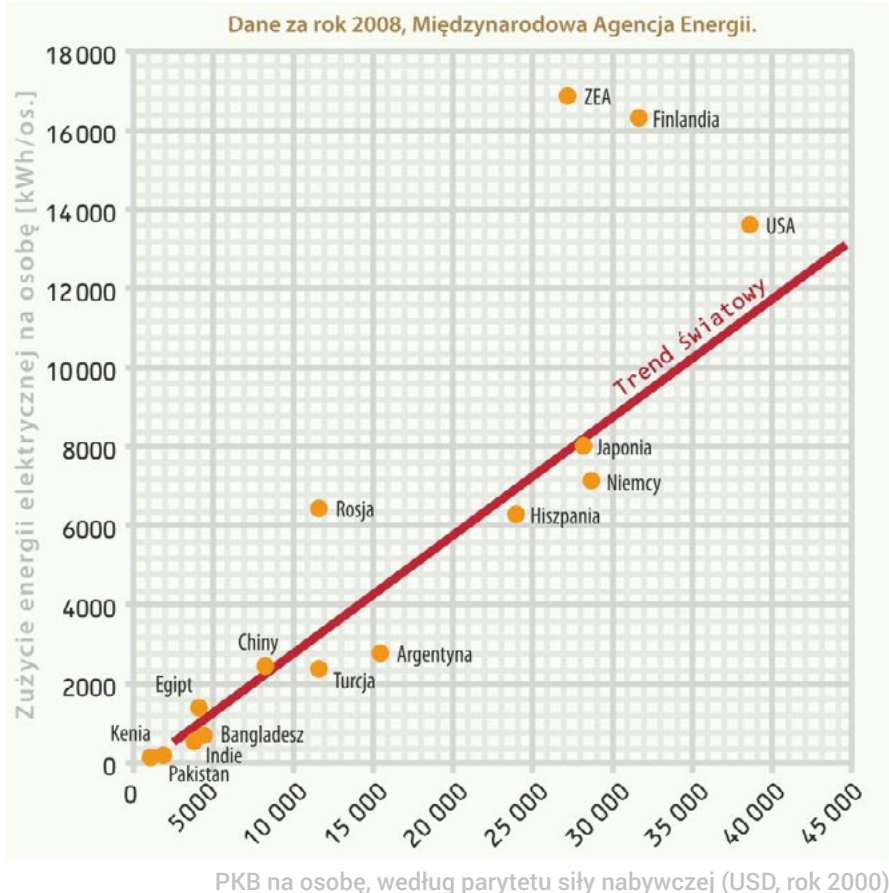
Jak wiesz już z lekcji 4, procesy związane z zaspokajaniem potrzeb energetycznych ludzkości, przede wszystkim wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła użytkowego, są jednym z głównych źródeł antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych. W roku 2017 spowodowały emisję 13,6 mld ton CO₂ (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2020), co stanowi 41% emisji całkowitej. Należy odnotować, że roczne emisje z energetyki rosną niemal nieprzerwanie od początku lat 90., a jedyny istotny spadek miał miejsce w roku 2009 w związku z kryzysem gospodarczym; suma emisji w roku 2018 była o 76% wyższa niż w 1990 (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2020). Kolejny istotny spadek emisji ma miejsce obecnie z powodu ograniczeń wywołanych pandemią COVID-19. W chwili pisania niniejszego tekstu trudno jednak ocenić jego charakter. Warto jednak wspomnieć, że poprzedni istotny spadek, wywołany kryzysem gospodarczym w latach 2008–2009, okazał się przejściowy.

Nie ulega wątpliwości, że dla mitygacji rozmiarów i skutków katastrofy klimatycznej energetyka niemal na całym świecie musi przejść znaczącą transformację. Przy dyskusji o transformacji systemów energetycznych (inaczej „transformacji energetycznej”) bardzo ważne jest zrozumienie pewnych uwarunkowań zarówno technicznych, jak i historycznych.

Współczesna cywilizacja potrzebuje energii

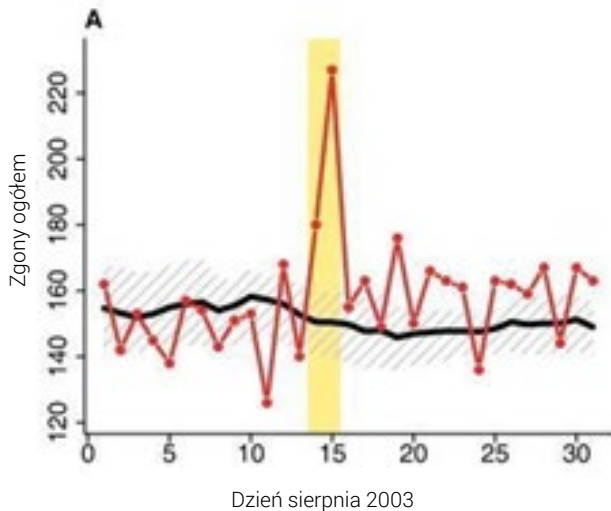
Jak możesz pamiętać z lekcji 5, energetyka jest jedną z najważniejszych branż umożliwiających rozwój gospodarki i ludzkiej cywilizacji. Wiele prac wskazuje na zależność pomiędzy PKB – zarówno na poziomie krajowym, jak i globalnym – a zużyciem energii, w tym szczególnie elektrycznej (rysunek poniżej). Jakkolwiek zależność nie jest liniowa, a wskaźnik PKB jako miara rozwoju cywilizacyjnego także nie jest pozbawiony wad, można z całą pewnością stwierdzić, że do chwili obecnej nie było możliwe stworzenie wysoko rozwiniętej gospodarki ani społeczeństwa o wysokiej stopie życiowej bez dostępu do energii elektrycznej.





Rysunek 1: Zależność pomiędzy zużyciem energii elektrycznej na osobę a PKB wyrażonym według parytetu siły nabywczej na osobę (Klimstra & Hotakainen, 2011).

Zakłócenia dostaw energii elektrycznej tworzą zagrożenie nie tylko dla szeroko rozumianego rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego, ale także bezpośrednio dla ludzkiego zdrowia i życia. Oczywiście jest, że bardzo wiele urządzeń wykorzystywanych do ratowania ludzkiego życia wymaga zasilania energią elektryczną. Dlatego zapewnienie niezawodnego zasilania placówek służby zdrowia jest sprawą krytycznie istotną. Z tego jednak powodu są one wyposażane we własne awaryjne układy wytwarzania energii elektrycznej, które pozwalają im na przetrwanie nawet kilkudniowych przerw w zasilaniu. Niemniej, badania wskazują, że nawet krótkotrwała przerwa w zasilaniu dużej nowoczesnej metropolii prowadzi praktycznie natychmiast do wystąpienia statystycznie istotnego wzrostu liczby zgonów, przy czym wynika to zarówno z wypadków, które wynikły z utraty zasilania (np. ciemności, ale też przerwy w działaniu czujek dymu), jak i innych przyczyn (np. braku możliwości skorzystania z wind, wolniejszego czasu reakcji służb ratunkowych i utrudnionego dostępu do nich wskutek ograniczeń w funkcjonowaniu telefonii) (Anderson & Bell, 2020). Doskonale pokazuje to wykres poniżej, przedstawiający skutki awarii energetycznej w Nowym Jorku.

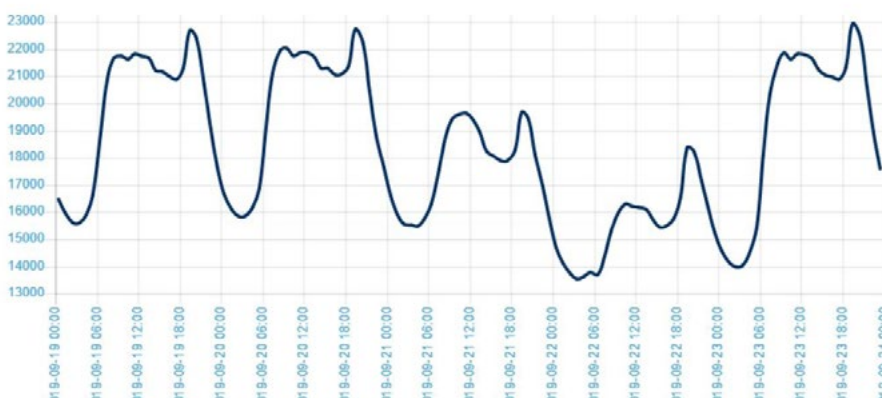


Rysunek 2: Śmiertelność dobowa w Nowym Jorku z zaznaczonym na żółto okresem blackoutu w dniach 14–15 sierpnia 2003 r.; (Anderson & Bell, 2020).

Energię trudno jest magazynować

Jednym z głównych zadań energetyki jako branży jest zapewnianie maksymalnej pewności zasilania, czyli możliwości wyprodukowania oraz dostarczenia energii do każdego odbiorcy. W związku z tym energetyka składa się z trzech istotnych elementów: mocy wytwórczych, których zadaniem jest wytworzenie energii oraz zapewnienie bilansowania systemu, sieci przesyłowych, których zadaniem jest przesyłanie energii od wytwórców do skupisk odbiorców, oraz sieci dystrybucyjnych rozpraszających energię do poszczególnych odbiorców.

Należy przy tym pamiętać, że energia elektryczna musi być produkowana dokładnie w tym samym momencie, kiedy jest zużywana. W każdej chwili moc dostarczana do systemu elektroenergetycznego (sieci) musi się równać mocy z niego odbieranej (z uwzględnieniem strat). W przewodnikach składających się na system nie da się zmagazynować żadnej ilości energii. Jednocześnie zużycie energii elektrycznej zmienia się, zarówno w cyklach dobowych, jak i sezonowych, w związku z cyklami pracy gospodarki i trybem życia ludzi (zobacz rysunek 3). Oznacza to, że elektrownie dostarczające energię do systemu – przynajmniej niektóre – muszą zmieniać swoją moc zgodnie ze zmiennością zapotrzebowania. Tradycyjnie proces ten realizowany jest tylko przez pewną wąską grupę wyspecjalizowanych dużych elektrowni, które dysponują odpowiednimi systemami technicznymi do realizacji bilansowania i regulacji. Nad całością procesu czuwają też wyznaczone organizacje – operatorzy systemów przesyłowych.



Rysunek 3: Przebieg zmienności zapotrzebowania na moc w polskim systemie elektroenergetycznym w czterech dniach września 2019 roku (czwartek–niedziela). Widoczna charakterystyczna krzywa z wzrostami porannymi i szczytem wieczornym, a także istotnie mniejsze zapotrzebowanie w czasie weekendu (PSE S.A., 2020).

Jakkolwiek w samej sieci magazynować energii się nie da, istnieją pewne techniczne możliwości magazynowania energii, jednak są one ograniczone. Wszystkie one opierają się o zamianę energii elektrycznej na inną formę energii, a następnie ponownym wytworzeniu elektryczności. W chwili obecnej jedyną stosowaną technologią magazynowania energii na skalę systemową są tzw. elektrownie szczytowo-pompowe. Są to układy dwóch zbiorników wodnych położonych na różnych wysokościach. Układ taki umożliwia zmagazynowanie części energii elektrycznej dostarczonej do systemu poprzez wpompowanie wody na wyższy poziom (zamiana na energię potencjalną), a następnie ponowne wytworzenie energii elektrycznej przez turbiny wodne w innym czasie. Takie obiekty są technologią dojrzałą, jednak możliwości ich budowy są silnie uwarunkowane geograficznie. Istnieją także inne technologie, jednak ich znaczenie w tym momencie jest ograniczone. W chwili obecnej szczególnie dynamicznie rozwijają się układy oparte o akumulatory elektrochemiczne (popularnie zwane „bateriami”). Niestety nawet prognozowane moce i pojemności takich magazynów nie wystarczają, aby myśleć o nich jako o rozwiązaniu dla problemu długoterminowego magazynowania znaczących ilości energii w skali dni i tygodni. Mogą one być natomiast bardzo użyteczne do krótkoterminowego stabilizowania pracy systemu. W chwili obecnej rozwijane są także inne koncepcje, w szczególności magazynowania energii w wodorze czy metanie (tzw. technologie *power-to-gas*). Polegają one na wykorzystaniu energii elektrycznej (najlepiej pochodzącej ze źródeł nisko- lub bezemisyjnych) do wytworzenia wodoru lub metanu, a następnie wykorzystania powstałego gazu jako paliwa do tradycyjnej instalacji energetycznej w innym czasie. Niestety na obecną chwilę są to technologie niedopracowane. Jeszcze istotniejszym problemem jest niska sprawność takiego procesu rozumiana jako stosunek energii elektrycznej zwróconej do systemu do energii oryginalnie pobranej. Nawet przyjmując najbardziej optymistyczne szacunki sprawności tych procesów, do systemu wracałoby tylko około jednej trzeciej „zmagazynowanej” w ten sposób energii elektrycznej.



By Ongrys – Praca własna, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5054925>

Fakt, że możliwości magazynowania energii na skalę systemową są bardzo ograniczone, tworzy dodatkowe wyzwania dla układów technicznych wykorzystywanych do produkcji i dystrybucji energii, w szczególności systemów sterowania. W krajach wysokorozwiniętych wyniki są bardzo dobre, a przypadki dłuższych przerw w zasilaniu na większym obszarze są bardzo rzadkie. Jest to efekt wielu dekad rozwoju branży, które doprowadziły do powstania krajowych i międzynarodowych zintegrowanych systemów energetycznych wraz ze skomplikowanymi systemami sterowania i bilansowania, a także spójnym otoczeniem prawnoregulacyjnym.

Duże inwestycje wymagają dużo czasu

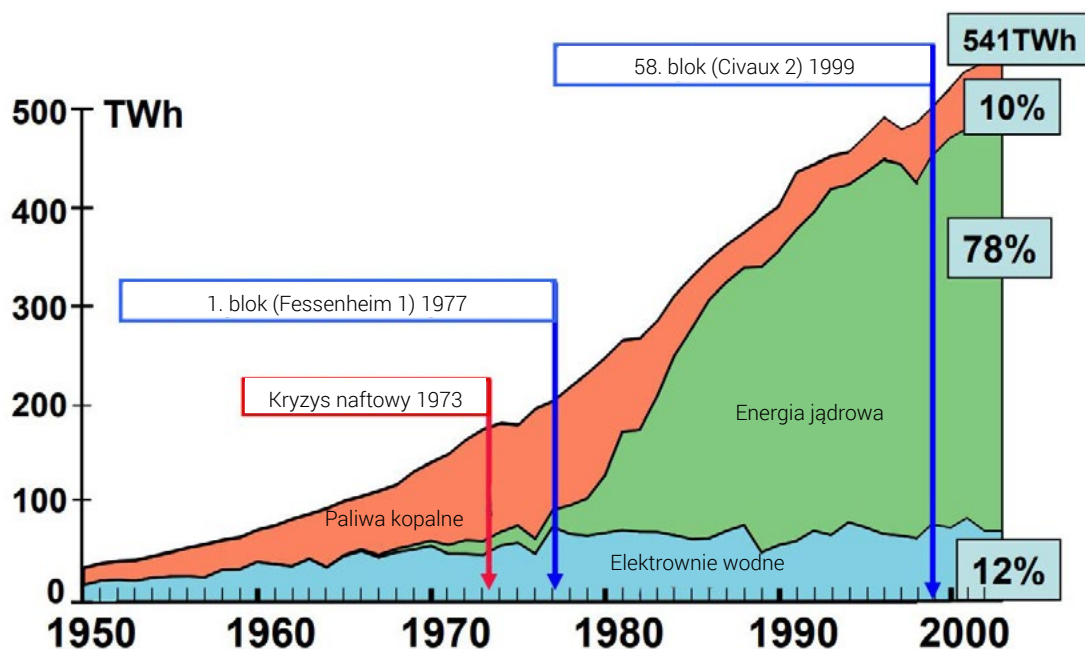
Przebudowa systemu wytwarzania i dystrybucji energii na skalę regionu, kraju, a tym bardziej globu, to proces bardzo długotrwały. Każda inwestycja wymaga zaplanowania, przygotowania, uzyskania odpowiednich zgód, finansowania i wreszcie przeprowadzenia budowy czy instalacji – każdy z tych etapów

zajmować może miesiące lub lata. Część procesów, związanych np. z otoczeniem prawno-regulacyjnym albo finansowaniem, można skracać na drodze politycznej, jednak na poziomie czysto technicznym – projektowania i fizycznej realizacji pojedynczych instalacji energetycznych takie możliwości są ograniczone. Istnieje zróżnicowanie pomiędzy technologiami, niemniej poważne zmiany w funkcjonowaniu energetyki w skali kraju to zadanie na wiele lat albo dekad, nawet w sytuacji znacznej determinacji politycznej.

PRZYKŁAD

Prawdopodobnie najszerzej zakrojonym całościowym planem szybkiej transformacji energetyki uprzemysłowionego kraju był tzw. Plan Messmera, czyli francuski strategiczny program zastępowania wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych energetyką jądrową.

Został on wdrożony jako skutek kryzysu naftowego, a jego głównym celem była zmniejszenie zależności Francji od importu surowców energetycznych. Plan ogłoszony w 1973 roku doprowadził do sprowadzenia w drugiej połowie lat 80. generacji z paliw kopalnych z około 100 TWh rocznie do poziomu około 50 TWh rocznie, na którym utrzymuje się ona do chwili obecnej oraz – co nie mniej istotne – pokrycie całego znaczącego przyrostu zapotrzebowania (zobacz rysunek 4). Należy jednak zwrócić uwagę, że wdrożenie Planu Messmera nie powodowało konieczności przebudowy całego systemu energetycznego, a w szczególności koncepcji jego działania czy systemu dystrybucji energii, a „jedynie” budowy nowych elektrowni. Fakt, iż charakterystyka pracy bloków jądrowych z systemowego punktu widzenia jest całkiem podobna do charakterystyki elektrowni pracujących na paliwach kopalnych, szczególnie takich, jakie istniały w tamtym okresie, a także to, że korzystano z dopracowanych już technologii, były znaczącym ułatwieniem.



Rysunek 4: Ogłoszony w 1973 roku Plan Messmera pozwolił Francji na zredukowanie wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych do stałego poziomu ok. 50 TWh rocznie w ciągu półtora dekad, mimo jednoczesnego dynamicznego wzrostu zapotrzebowania (Ponchet, 2007).

Uwarunkowanie historyczne

Dzisiejszy kształt systemów elektroenergetycznych jest efektem procesów technicznych, politycznych oraz historycznych. Przykładowo: fakt, że wykorzystujemy systemy prądu przemiennego, wynika z decyzji podjętych jeszcze w końcu XIX stulecia i podyktowanych ówczesnymi możliwościami technicznymi (a konkretnie brakiem możliwości łatwej transformacji napięcia w systemach prądu stałego, niezbędnej do przesyłania energii na dużą odległość).

W pewnych przypadkach uwarunkowania historyczne mogą prowadzić do sytuacji, w której obecny system nie jest optymalny – gdybyśmy budowali go dzisiaj „od zera”, wybralibyśmy bardziej korzystne rozwiązania. Jednocześnie ze względu na wspomnianą już wyżej konieczność zapewnienia stałych dostaw energii czy sam fizyczny rozmiar instalacji nie jest możliwe wyłączenie całego systemu i zastąpienie go innym.

W końcu XIX wieku, kiedy następowała szybka industrializacja Japonii, dwie główne metropolie – Tokio i Osaka – rozpoczęły elektryfikację przy użyciu dostawców z różnych stron świata. W efekcie w Tokio, na drodze importu technologii z Niemiec, powstał system o częstotliwości 50 Hz. W Osace natomiast zastosowano technologię amerykańską z częstotliwością 60 Hz. Póki systemy były ograniczone do pojedynczych miast, nie stanowiło to problemu, jednak z czasem doszło do ich rozrostu i kontaktu. W efekcie do dziś jedna część Japonii ma system 50 Hz jak Europa, a druga – 60 Hz jak USA.

Jest to sytuacja zupełnie nieoptymalna, możliwości przesyłu energii pomiędzy tymi częściami są bowiem bardzo ograniczone, a w jednym kraju konieczne jest stosowanie dwóch różnych standardów urządzeń przemysłowych.

Jednocześnie systemy te są już dziś tak bardzo rozbudowane, że przebudowa jednego z nich na inną częstotliwość nie wchodzi w grę – wymagałoby to w praktyce budowy zupełnie nowego „równoległego” systemu w połowie kraju dla zapewnienia bezprzerwowego zasilania, a następnie wymiany praktycznie wszystkich urządzeń elektrycznych innych niż elektronika użytkowa czy AGD. Jest to praktycznie niemożliwe nawet dla tak zamożnego i wysokorozwiniętego kraju.

PRZYKŁAD



ZAPAMIĘTAJ

Z uwagi zarówno na uwarunkowania techniczne, jak i ekonomiczne (konieczność rozłożenia inwestycji w czasie) nawet całkowita transformacja systemu energetycznego, prowadząca do pełnej zmiany bilansu źródeł energii, musi być dokonywana w sposób ewolucyjny i nie może opierać się na zakwestionowaniu i odrzuceniu systemów już funkcjonujących.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

KU NISKIM EMISJOM

Jakie są dostępne możliwości ograniczenia emisyjności energetyki?

Teoretycznie istnieją trzy możliwości:

- redukcja zużycia energii, szczególnie elektrycznej,
- zastosowanie układów wychwyty i składowania (lub utylizacji) dwutlenku węgla ze spalin,
- zastępowanie technologii charakteryzujących się wysoką emisyjnością rozwiązaniami nisko- lub bezemisyjnymi.

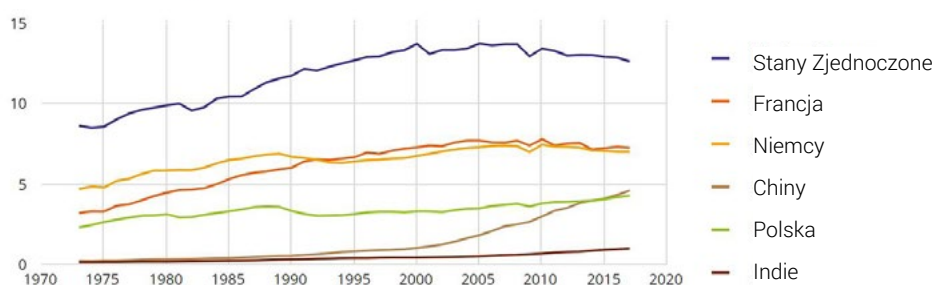
Rozważmy je po kolei.

Redukcja zużycia

Teoretycznie najprostszym sposobem uniknięcia skutku jest usunięcie jego przyczyny, a więc w przypadku emisji wynikających z wytwarzania energii elektrycznej sprawienie, by stała się niepotrzebna. Niestety, zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie nie tylko nie wykazuje żadnych tendencji spadkowych – ono sukcesywnie rośnie: w roku 2018 łączna produkcja światowa była o 123% wyższa niż w roku 1990, a ostatnie podwojenie produkcji trwało 13 lat (tu i dalej w niniejszym akapicie dane za: Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019). Jedynym momentem, kiedy produkcja w ujęciu rocznym spadła, był rok 2009 – wynikało to z globalnego kryzysu gospodarczego. Jednak już w 2010 tendencja wzrostowa powróciła, a spadek został nadrobiony. Co ważniejsze, wzrost jest rozłożony bardzo nierównomiernie i dotyczy przede wszystkim szeregu gospodarek rozwijających się. Przy tym trzeba pamiętać, że jak wspomniano wyżej, zaopatrzenie w energię elektryczną jest nieodłącznym elementem podnoszenia stopy życiowej społeczeństw. W 2017 roku średnie globalne zużycie energii elektrycznej na mieszkańca wynosiło 3,42 MWh. Dwa kraje, w których było ono najbardziej zbliżone do średniej globalnej, to Iran i Turcja (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019).

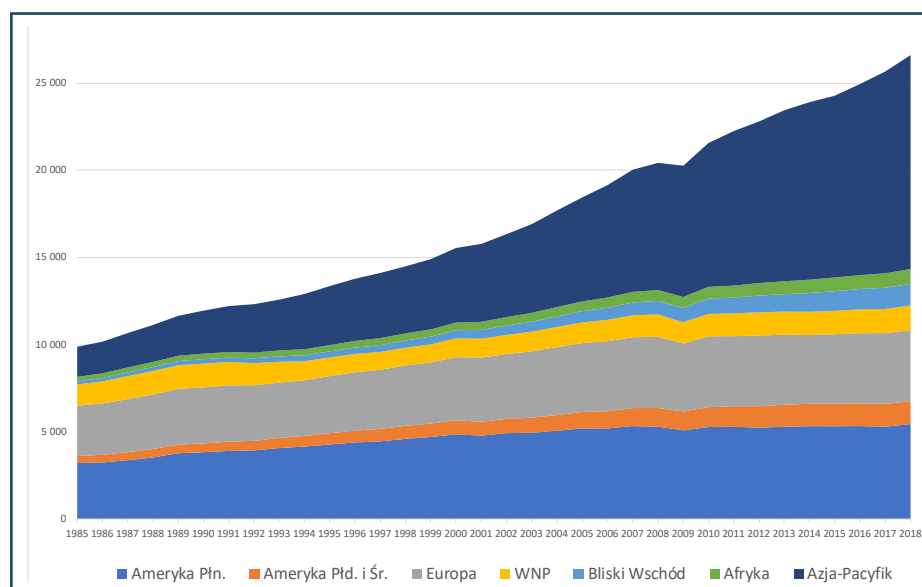
Oczekiwanie, by gospodarki te choćby zaprzestały wzrostu zużycia energii, nie mówiąc już o redukcji, jest nierealistyczne. Jednocześnie jakiegokolwiek oszczędności poczynione ewentualnie w świecie wysokorozwiniętym nie będą w stanie wyrównać wzrostu produkcji w gospodarkach rozwijających się. Dla przykładu: wzrost rocznej produkcji energii elektrycznej w samych tylko Indiach i Chinach w latach 2010–2018 (+3528 TWh) był wyższy, niż całe roczne zużycie w Unii Europejskiej w roku 2018 (3282 TWh). Ujmując rzecz inaczej – aby skompensować ów wzrost w Indiach i Chinach, w tym samym czasie kraje OECD musiałyby ograniczyć swoje zużycie, które wyniosło w 2010 roku 10 992 TWh, o jedną trzecią. Na marginesie zauważmy, że w tym okresie produkcja w krajach OECD w istocie nie tylko nie spadła, ale nawet nieznacznie wzrosła (do 11 233 TWh – a więc o nieco ponad 2%). Pamiętać należy, że także wśród krajów Unii Europejskiej są takie na nieco niższym poziomie rozwoju, gdzie zużycie energii wciąż dynamicznie rośnie. Jednym z takich krajów jest Polska (patrz rysunek 5). Wreszcie warto odnotować, że niektóre trendy związane z ochroną środowiska mogą prowadzić do wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną także w krajach bogatych – jednym z najbardziej oczywistych jest elektryfikacja transportu.

Zużycie energii elektrycznej na osobę (MWh/os.)



Rysunek 5: Zużycie energii elektrycznej per capita dla wybranych krajów świata (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019).

Oczywiście zadania mające na celu optymalizację zużycia energii i podnoszenie efektywności jej wykorzystania ze wszech miar zasługują na wsparcie jako pożądane i korzystne dla środowiska, nie tylko w wymiarze klimatycznym. Nawet jeśli nie doprowadzą do zmniejszenia globalnego zużycia energii elektrycznej, to mogą znacząco ograniczyć tempo jego przyrostu. Równocześnie zastępowanie innych nośników energii energią elektryczną, na przykład we wspomnianym już transporcie, spowoduje ograniczenie na nie zapotrzebowania. Dlatego też efektywność energetyczna i oszczędzanie energii, choć bardzo istotne, nie zastąpią przebudowy systemu energetycznego i wymiany źródeł energii elektrycznej na bezemisyjne.



Rysunek 6: Produkcja energii elektrycznej w rozbiu na regiony wg (BP, 2019). Widać dominujące znaczenie rejonu Azji i Oceanii. Warto zauważyć, że nawet kryzys gospodarczy w 2009 roku nie przyniósł żadnej trwałej zmiany trendu.

Uwaga: podział na regiony według autorów opracowania BP, w szczególności warto odnotować, że „Ameryka Północna” obejmuje tylko Kanadę, Meksyk i USA, a „Azja-Pacyfik” obejmuje Azję bez b. ZSRR, Australię i Oceanię.

Układy wychwyty dwutlenku węgla

Kolejnym potencjalnym rozwiązaniem jest unikanie emisji dwutlenku węgla na drodze jego wychwyty ze spalin – już po spalaniu paliw kopalnych. Taki wychwycony dwutlenek węgla mógłby być składowany w składowiskach podziemnych lub podmorskich, np. wyeksploatowanych złóżach gazu ziemnego czy ropy naftowej. Zatlaczanie CO₂ do złóż bywa już zresztą stosowane w celu wspomagania wydobywania. Powszechne zastosowanie wychwyty i składowania CO₂ (często określanego skrótem CCS od angielskiego *carbon [dioxide] capture and storage*) niesie ze sobą jednak szereg trudności, przede wszystkim związanych z energochłonnością procesu (co prowadziłoby do wzrostu zapotrzebo-

wania na paliwo w celu uzyskania takiej samej ilości energii końcowej), obawami o szczelność składowisk oraz trudnościami związanymi z transportem wychwyconego gazu z elektrowni do miejsca składowania.

Najpoważniejszą jednak przeszkodą do oparcia dziś polityki dekarbonizacyjnej o CCS jest bardzo słaba dojrzałość technologii. Na świecie nadal istnieją tylko nieliczne instalacje demonstracyjne oraz kilka przemysłowych, związanych z przemysłem wydobywczym (niektóre z tych ostatnich powstały jeszcze w latach 70. XX wieku). Do tego większość z nich nie prowadzi produkcji energii elektrycznej. W roku 2019 pracujących instalacji CCS skali przemysłowej było 19; kolejne cztery znajdowały się w budowie. Wspólnie owe 23 instalacje będą miały zdolności wychwytu ok. 40 mln ton CO₂ rocznie. Jest to ilość mniej więcej odpowiadająca 1/3 rocznej emisji polskiej energetyki. Co jednak jeszcze istotniejsze, tylko dwie z owych 19 istniejących instalacji (i żadna z obecnie budowanych) to bloki energetyczne.

Jest to skala niewystarczająca nawet do zidentyfikowania wszystkich trudności, jakich można oczekiwać przy wdrażaniu takiej technologii na szerszą skalę, nie mówiąc już o rozwiązywaniu odkrytych problemów.

Osobnym problemem jest utworzenie odpowiednich składowisk dla istotnych z punktu widzenia globalnego bilansu ilości dwutlenku węgla oraz transportowanie wychwyconego gazu do tych składowisk. Problematyka magazynowania dużych ilości wychwyconego CO₂ – w skali istotnej dla poszczególnych krajów, regionów i świata – nie wyszła na razie poza opracowania teoretyczne.

W tym świetle trudno uznać, by technologia CCS mogła w najbliższej przyszłości być gotowa do masowego wdrożenia w energetyce – przeciwnie, dwie instalacje pracujące od zaledwie kilku lat to z pewnością zbyt mało, by choćby rozwiązać niewątpliwie zaobserwowane w trakcie ich pracy problemy i usunąć wady. Warto przy tym przypomnieć, że jeszcze kilkanaście lat temu na forum międzynarodowym – w tym na forum Unii Europejskiej – dyskutowane były pomysły wprowadzenia obowiązku stosowania CCS od roku 2020 (np. Komisja Europejska ze stycznia 2008). Pokazuje to, jak ostrożnym należy być w formułowaniu polityki energetycznej w oparciu o rozwiązania, które nie osiągnęły jeszcze dojrzałości technicznej.

Technologie niskoemisyjne i bezemisyjne

W istocie pozostaje zatem droga trzecia – sukcesywne przechodzenie na źródła o niższej emisyjności. W tej kategorii istnieją trzy możliwości: źródła odnawialne, źródła jądrowe oraz paliwa kopalne o niższej emisyjności (czyli w praktyce zastępowanie węgla gazem ziemnym).

Czym są źródła odnawialne?

Za **ODNAWIALNE ŹRÓDŁA ENERGII** uważa się takie, których dostępność nie zmienia się w skali czasowej istotnej dla rozwoju ludzkiej cywilizacji, niezależnie od tego, czy z nich korzystamy, czy nie.

Jest to rzecz jasna uproszczenie: nawet Słońce nie jest źródłem, które się w jakikolwiek sposób „odnowi”. W praktyce za odnawialne uznajemy energię geotermalną (wynikającą z różnicy temperatur wnętrza i powierzchni Ziemi oraz rozpadów promieniotwórczych izotopów wchodzących w skład planety), energię pływów i energię promieniowania słonecznego, a także pochodne tej ostatniej – a więc energię wiatru, płynących wód czy fal morskich i energię chemiczną biomasy.

Źródła odnawialne z praktycznego punktu widzenia charakteryzują się praktycznie nieograniczoną ilością energii, jaką z nich można otrzymać, ale narzucają ograniczenia na moc (czyli stosunek energii do czasu), jaką można pozyskać w danym miejscu, nie sposób bowiem sprawić, by wiatr czy energia słoneczna zostały skoncentrowane w jakimś miejscu albo „zwiezione na zapas”. Jest to sytuacja dokładnie odwrotna niż w przypadku tradycyjnych źródeł kopalnych, gdzie skończone są zasoby, ale możliwość ich transportu daje dość swobodne możliwości koncentracji instalacji energetycznych w wybranych lokalizacjach. Prowadzi to m.in. do znacznie większej powierzchni terenu niezbędnej do korzystania z większości źródeł odnawialnych.

Źródła odnawialne

Odnawialne źródła energii (OZE) stanowią bardzo atrakcyjny kierunek transformacji energetycznej. Potencjalnie stanowią przy tym odpowiedź nie tylko na palący problem postępującej zmiany klimatu, ale także na przyszłe wyzwanie związane z coraz mniejszą dostępnością wyczerpujących się zasobów paliw. Niestety wdrażanie ich na większą skalę do systemów energetycznych nie jest sprawą prostą.

Z punktu widzenia globalnego bilansu energii znaczenie mają przede wszystkim trzy rodzaje instalacji OZE: elektrownie wodne, wiatrowe i słoneczne.

Elektrownie wodne stanowią dość szczególny przypadek, dlatego że – w odróżnieniu od innych technologii energetyki odnawialnej – rozwijały się intensywnie już na przełomie XIX i XX wieku, a technologie z nimi związane bardzo dawno osiągnęły pełną dojrzałość. Dzięki temu w chwili obecnej hydroenergetyka jest trzecim co do znaczenia źródłem energii elektrycznej – po elektrowniach węglowych i gazowych – dostarczając około 16% elektryczności w skali świata (te i dalsze dane statystyczne w tym podrozdziale za: BP, 2019). Niestety, paradoksalnie ogranicza to możliwości redukcji emisji przy pomocy tych technologii, bowiem potencjał budowy istotnych mocy w elektrowniach wodnych w krajach rozwiniętych został już w dużej mierze wyczerpany. Przy tym budowa nowych źródeł tam, gdzie jeszcze to możliwe, jest mało prawdopodobna – pozostały już głównie lokalizacje o dość ograniczonym potencjale energetycznym, natomiast realizacja takich elektrowni prowadziłaby do sporych szkód środowiskowych (przykładem takiej sytuacji jest potencjalna kaskada Dolnej Wisły).

Obecnie elektrownie wodne budowane są przede wszystkim w krajach rozwijających się; najszybszy przyrost mocy w takich instalacjach (jak i zresztą w każdej innej istotnej klasie technologii energetycznych) obserwowany jest w Chinach. Przyrosty te pozwalają na utrzymywanie udziału energetyki wodnej, pomimo wzrostu globalnej produkcji energii, trudno jednak mieć nadzieję na odegranie przez energetykę wodną znaczącej roli w procesie redukcji emisji – jest to co najwyżej zapobieganie jeszcze większym wzrostom. Należy przy tym pamiętać, że energetyka wodna osiągnie w pewnym momencie kres swojego potencjału także w krajach rozwijających się – jest to branża bardzo silnie ograniczona warunkami geograficznymi.

Elektrownie wiatrowe i słoneczne są tymi rodzajami OZE, które realnie mają szansę przyczynić się do redukcji emisji z energetyki. Jakkolwiek technologie te także oparte są o procesy znane już wiele lat temu (pierwsza turbina wiatrowa wytwarzająca energię elektryczną powstała w 1887 roku, a ogniwo słoneczne w 1954), to ich wielkoskalowe wdrożenie do energetyki (poza bardzo ograniczonymi przypadkami, takimi jak farmy wiatrowe w niektórych rejonach Indii czy USA) nastąpiło dopiero w dobie aktywnej polityki klimatycznej, czyli już w XXI wieku. W chwili obecnej obie te grupy technologii rozwijają się bardzo dynamicznie, choć nierównomiernie w skali świata – najszybciej w Europie Zachodniej (gdzie zastępują stopniowo inne źródła energii) i Chinach (gdzie budowane są w dużej liczbie, ale obok źródeł innego rodzaju), ale jednocześnie bardzo wolno w innych rejonach świata, takich jak Rosja. W 2018 roku źródła odnawialne inne niż energetyka wodna (w praktyce oznacza to przede wszystkim właśnie instalacje wiatrowe i słoneczne) dostarczyły 9,3% energii elektrycznej – podczas gdy rok wcześniej tylko 8,4% – dynamika wzrostu jest bardzo wysoka. W Unii Europejskiej udział ten był znacznie powyżej średniej – na poziomie 21,5%, podczas gdy w USA było to 10,3%, w Chinach 8,9%, a w Indiach 7,8%, ale w całej Wspólnocie Niepodległych Państw zaledwie 0,2%, w Afryce – 3,7%, a na Bliskim Wschodzie – 0,6%.

Niestety masowe wdrażanie tych źródeł odnawialnych napotyka szereg problemów. W przeciwieństwie do omówionego wcześniej Planu Messmera – „atomizacji” energetyki francuskiej – uzyskanie wysokiego udziału źródeł wiatrowych i słonecznych w bilansie energetycznym wymaga znaczących zmian w całej strukturze systemu energetycznego. Jest to związane z zupełnie inną, niż w przypadku energetyki opartej o dominujące wcześniej technologie, charakterystyką pracy tych źródeł, która zależna jest od pogody, ale niekoniecznie (szczególnie w przypadku wiatru) ma jakikolwiek związek z przebiegiem zmienności zużycia energii w systemach energetycznych. Oznacza to, że dla przyłączania dużych ilości źródeł odnawialnych konieczna jest także transformacja pozostałej części energetyki: musi ona być w stanie sprawnie współpracować z OZE, których moc może zmieniać się bardzo szybko (przypomnijmy, że bilans systemu musi się zgadzać w każdej chwili). W systemach o dużym udziale OZE konieczna może być także znacząca rozbudowa systemu przesyłowego, jako że korzystne warunki geograficzne dla produkcji energii z tych źródeł mogą występować w rejonach zupełnie innych niż te, w których skoncentrowane są największe odbiory i tradycyjne elektrownie. Jest to na przykład wyzwanie dla niemieckiego systemu, w którym najlepsze warunki do rozwoju

energetyki wiatrowej panują na północy kraju oraz na morzach, ale koncentracje przemysłu występują na zachodzie i południu – podobne zjawisko występuje zresztą w Polsce.

Problemy z integracją źródeł wiatrowych i słonecznych stają się tym trudniejsze do rozwiązania, im więcej jest ich w danym systemie. Naturalnym ograniczeniem jest niestabilność podaży energii: w korzystnym momencie (słoneczny, wietrzny dzień albo wietrzna noc o niskim zapotrzebowaniu) źródła odnawialne mogą produkować nawet więcej energii niż w danej chwili potrzeba, ale w niekorzystnym (np. zimowy bezwietrzny wieczór) nie pracują niemal w ogóle, co wymusza zaspokajanie sporej części zapotrzebowania innymi źródłami. Warto także odnotować, że nawet w tych chwilach, gdy produkcja w źródłach wiatrowych i słonecznych matematycznie wystarcza do pokrycia zapotrzebowania (co zdarza się czasami np. w Niemczech czy Danii), w praktyce inne elektrownie nadal muszą pracować. Dzieje się tak dlatego, że elektrownie wiatrowe i słoneczne nie realizują funkcji regulacyjnych – niezbędnych dla utrzymania stabilnej pracy systemu energetycznego – a poza tym ich moc może szybko spaść, co wymusza szybkie ich zastąpienie przez inne elektrownie, a to można uzyskać tylko, jeśli część z nich pracuje bez przerw.

Rozwiązaniem może być zmagazynowanie energii z okresu nadwyżek produkcji, problem w tym, że jak wspomniano wcześniej, powszechnie dostępnych technologii magazynowania energii w odpowiednich ilościach i bez znacznych strat zwyczajnie nie ma. Innym rozwiązaniem może być po prostu ograniczanie produkcji w czasie, kiedy przewyższa ona popyt, ale to z kolei wymaga korekty przepisów gwarantujących odbiór wytworzonej w OZE energii – paradoksalnie w niektórych systemach systemy wsparcia od pewnego momentu stawać się mogą przeszkodą dla dalszego rozwoju źródeł odnawialnych; podobnie jest w przypadku zwolnienia tych źródeł z uczestnictwa w bieżącym bilansowaniu systemów – odpowiednie technologie w tym zakresie już istnieją, ale nie są masowo wdrażane z uwagi na brak takich wymogów.

Pomimo wszystkich tych ograniczeń, szereg systemów energetycznych z powodzeniem wdrożył spore udziały źródeł odnawialnych innych niż wodne – i to właśnie z zamiarem wykorzystania ich do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Przykładami takich krajów są Niemcy (32,2% w 2018), Wielka Brytania (31,6%) czy Hiszpania (25,7%).

Pomimo trudności technicznych z integracją naprawdę dużego udziału OZE, największym ograniczeniem w mitygacji emisji poprzez ich stosowanie wydaje się wspomniana już ich regionalizacja. Wysokie udziały źródeł wiatrowych czy słonecznych ograniczają się bowiem do tych krajów, które prowadzą aktywną politykę ich rozwoju, przede wszystkim Europy Zachodniej.

 **Elektrownie
z ujemnymi
emisjami?**

Do odnawialnych źródeł energii zaliczana jest także **BIOMASA** – materia pozyskiwana z organizmów żywych. Gdy podczas wzrostu roślina usuwa z atmosfery dwutlenek węgla, proces taki może mieć bilans emisyjny bliski zera pod warunkiem, że spalana jest biomasa specjalnie w tym celu uprawiana, tempo upraw dorównuje tempu zużycia, a procesy uprawy i transportu nie powodują istotnych emisji. W praktyce nie zawsze tak się dzieje i dochodzi do sytuacji takich jak spalanie drewna pozyskiwanego z wiekowych lasów, transportu morskiego biomasy nawet pomiędzy kontynentami, a także spalania oleju palmowego z plantacji powstałych w miejscu wyciętych (lub wypalonych) lasów deszczowych.

Jednocześnie należy odnotować, że instalacje oparte o spalanie biomasy pochodzącej z rozsądnie zaplanowanych upraw energetycznych tworzą szansę powstania instalacji o ujemnej emisyjności. Cel ten można osiągnąć, łącząc instalację spalającą biomasę z instalacją wychwytu i magazynowania wytworzonego w procesie spalania dwutlenku węgla (CCS, zob. wyżej). Warto wskazać, że wdrożenie takich instalacji na dużą skalę jest jedną ze wspólnych cech scenariuszy umożliwiających zatrzymanie ocieplenia klimatu na poziomie 1,5°C względem epoki przedprzemysłowej omówionych w Specjalnym raporcie IPCC (Masson-Delmotte i in., 2018). Niestety jednak, jak wskazano wyżej, technologie CCS są bardzo dalekie od gotowości do wdrożenia na masową skalę. Wydaje się, że opieranie scenariuszy polityki energetycznej na takich technologiach jest na chwilę obecną co najmniej przedwczesne.

 Energetyka jądrowa

Teoretycznie energetyka jądrowa mogłaby wydawać się prostszą ścieżką dekarbonizacji. Przede wszystkim istnieje wzorzec – wspomniany już Plan Messmera, który jest jedynym przykładem szybkiej dekarbonizacji energetyki dużego kraju uprzemysłowionego (choć prowadzony był z zupełnie innych pobudek). Jednocześnie energetyka jądrowa nie wymaga skomplikowanej transformacji systemu energetycznego, przekształcania systemów i logiki sterowania itd. Niestety sytuacja jest dużo bardziej skomplikowana.

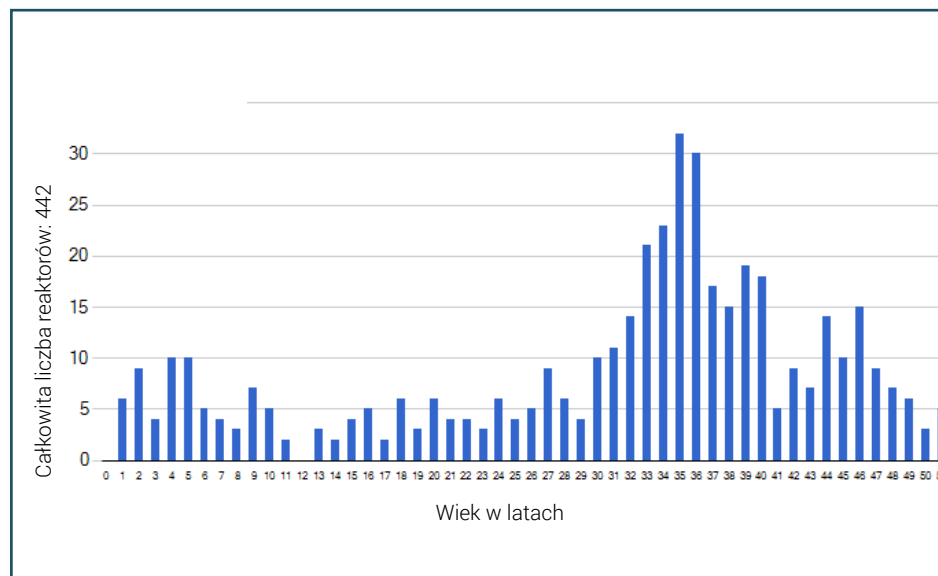
W rzeczywistości branża jądrowa, szczególnie w świecie zachodnim, znajduje się w bardzo kiepskiej kondycji. Okoliczności, takie jak uzyskanie uznanego ówczesnie za optymalny nasycenia energetyką jądrową dużych systemów energetycznych wielu krajów wysokorozwiniętych i spadek akceptacji społecznej dla tego źródła energii m.in. w następstwie katastrofy w Czarnobylu i wcześniejszej awarii w Three Miles Island, doprowadziły do znaczącego spadku zapotrzebowania na nowe elektrownie jądrowe w latach 90. ubiegłego wieku. W połączeniu z dużą długowiecznością większości istniejących elektrowni jądrowych, projektowanych typowo na 35–40 lat eksploatacji, a faktycznie zdolnych do pracy nawet przez 60–80 lat, doprowadziło to do stagnacji przemysłu jądrowego w świecie zachodnim. Sytuację pogorszyła jeszcze aktywna polityka likwidacji tego przemysłu (a przynajmniej tej jego części, która odpowiadała za rozwój technologii i budowę nowych instalacji) w kilku krajach: Wielkiej Brytanii, Niemczech i Szwecji. W dodatku w momencie, w którym pojawiły się szanse na pewien renesans atomu w wybranych krajach zachodnich, doszło do katastrofy w Fukushima, która podbiła obawy społeczne i zastopowała wie-

le programów jądrowych, a do tego doprowadziła do praktycznego zawieszenia pracy większości elektrowni jądrowych w Japonii. W rezultacie tych procesów przemysł jądrowy krajów zachodnich (co dziś oznacza przede wszystkim USA i Francję) ma na dziś zdolności do realizacji zaledwie kilku nowych bloków na raz i to z wielkimi opóźnieniami i przekroczeniami budżetów (z najbardziej wymownymi przykładami fińskiego bloku Olkiluoto-3, którego budowa miała zakończyć się w roku 2009, a w rzeczywistości potrwa przynajmniej do 2021, oraz amerykańskiej inwestycji V.C. Summer, która została w ogóle zarzucona), podczas gdy w najlepszych latach – w połowie lat 80. – przekazywano ich do eksploatacji ponad 30 rocznie. Jądrowy przemysł japoński ma na dziś zupełnie niejasne perspektywy. Także w Korei Południowej po latach dość prężnego rozwoju dochodzi do stagnacji. W chwili obecnej branża budowy nowych elektrowni jądrowych funkcjonuje prężnie w dwóch krajach: w Chinach (na chwilę obecną głównie na własny użytek) oraz w Rosji (zarówno na rynek wewnętrzny, jak i na rzecz elektrowni budowanych za granicą). Jedynym krajem, który intensywnie rozbudowuje swoją energetykę jądrową, są właśnie Chiny. To głównie chińskie inwestycje sprawiły, że roczna produkcja energii w elektrowniach jądrowych wyrównała w 2019 roku wcześniejszy rekord uzyskany półtorej dekady wcześniej. Stagnacja w wytwarzaniu przy jednoczesnym wzroście globalnej produkcji oznacza, że udział energetyki jądrowej w światowym bilansie energetycznym systematycznie spada – od maksymalnego poziomu, przekraczającego 15% na początku stulecia, do aktualnej wartości ok. 10% (10,2% w 2018 roku – BP, 2019).

Aktualna sytuacja branży jądrowej, w porównaniu z raczej niechętną atomowi polityką wielu krajów zachodnich, nie tylko ogranicza szanse na wykorzystanie atomu w procesie istotnej dekarbonizacji energetyki, ale stwarza zagrożenie wzrostem emisji w miarę wycofywania z eksploatacji istniejących już bloków. Proces ten (wraz z wiążącymi decyzjami politycznymi) jest systematycznie odraczany, dzięki temu, że większość reaktorów jądrowych można bezpiecznie eksploatować dużo dłużej, niż przewidywano w momencie ich budowy – jedna z amerykańskich elektrowni jądrowych otrzymała już zezwolenie dozoru na 80-letnią eksploatację. Jest też szereg przypadków wydłużania eksploatacji do 60 lat. Paradoksalnie może to tylko spotęgować problem braku potencjału przemysłowego, prowadząc do sytuacji, w której w momencie, kiedy trzeba będzie zastąpić stare elektrownie jądrowe nowymi, przemysł nie będzie w stanie tego procesu wystarczająco szybko zrealizować.

Rzadkim przykładem kraju, który próbował podejść do tego zagadnienia w sposób systematyczny, jest Wielka Brytania. Niestety, mimo przygotowania szczególnych mechanizmów zabezpieczających finansowanie oraz sprawny proces wydawania niezbędnych pozwoleń, tylko niektóre z zaplanowanych instalacji są faktycznie realizowane. Napotkane problemy obejmują zarówno rezygnację inwestorów, którzy uzyskali prawa do budowy elektrowni w konkretnych realizacjach, jak i brak własnego przemysłu zdolnego do budowy elektrowni jądrowych. Wielka Brytania przemysł taki posiadała – była jedną z kolebek cywilnej energetyki jądrowej – ale w latach 90. został on praktycznie zlikwidowany. Z drugiej strony, w Rosji, w której zdolności przemysłu jądrowego zostały utrzymane na wysokim poziomie, proces wymiany pokoleniowej najstarszych

reaktorów postępuje, choć także z pewnymi opóźnieniami. W dalszej perspektywie kluczowe będzie podejście trzech innych krajów - Francji, USA oraz Japonii - decydujących o roli, jaką odegra energetyka jądrowa w dekarbonizacji. W chwili obecnej tylko Francja przygotowuje się do opracowania planów w tym zakresie.



Rysunek 7: Wiek aktualnie eksploatowanych energetycznych bloków jądrowych.

Wiek reaktora jest określany na podstawie roku przyłączenia instalacji do sieci. Reaktory przyłączone w danym roku są traktowane jako mające 0 lat.

Zwraca uwagę duża liczba jednostek starszych niż 30 lat (Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, 2020).

Poza trudnościami związanymi z gotowością przemysłu do budowy nowych instalacji oraz czasem potrzebnym do ewentualnego odtworzenia tej gotowości należy mieć także na uwadze szereg problemów społeczno-politycznych, w tym spory opór społeczny w niektórych krajach, związany zarówno z samymi elektrowniami, jak i procesem przetwarzania i składowania odpadów, a także konstrukcją współczesnych rynków energii, która nie sprzyja kapitałochłonnym inwestycjom długoterminowym.

W tym kontekście, jakkolwiek energetyka jądrowa stanowi i nadal będzie stanowić jeden z istotnych składników bezemisyjnej energetyki, to szybki i znaczący wzrost jej udziału w skali globalnej wydaje się w najbliższej perspektywie czasu mało prawdopodobny. Wyzwaniem będzie już utrzymanie udziału obecnego, a w szczególności zastąpienie istniejących reaktorów, które wciąż odgrywają bardzo znaczącą rolę w gospodarkach krajów wysokorozwiniętych – udział energetyki jądrowej w wytwarzaniu energii elektrycznej w krajach OECD wynosi bowiem 17,5%, a w Unii Europejskiej aż 25,2% (dla UE jest to mniej więcej tyle samo, co udział całej energetyki odnawialnej, wliczając wodną) (BP, 2019).

Zmiana paliwa

Technicznie najprostszym środkiem ograniczania, ale nie eliminowania, emisji, jest zmiana paliw kopalnych na takie o niższej emisyjności. Efekty na dużą skalę może tu przynieść w szczególności zastępowanie wytwarzania energii z węgla wytwarzaniem z gazu ziemnego. Uzyskiwany efekt zawdzięczany jest tu zarówno składowi chemicznemu (pisałmy o tym w lekcji 4), jak i generalnie wyższej sprawności elektrowni gazowych. W efekcie emisyjność energetyki gazowej mierzona emisjami w spalinach jest około dwukrotnie niższa niż węglowej. Tu należy jednak poczynić istotne zastrzeżenie. Metan uwalniany do atmosfery ma dużo większy wpływ na efekt cieplarniany niż dwutlenek węgla. Jednocześnie w układach wydobywania, przesyłu i dystrybucji gazu



Więcej o obawach społecznych związanych z energetyką jądrową i tym na ile są one uzasadnione przeczytasz tutaj »

ziemnego muszą występować pewne wycieki tego gazu do atmosfery. Skutki tych wycieków nie są na ogół brane pod uwagę przy konstruowaniu bilansów emisyjnych. Wielkości wycieków nie są też systematycznie monitorowane. Można obliczyć, że – gdyby w procesie transportu pomiędzy szybem wydobywczym a elektrownią do atmosfery ulatniało się kilkanaście procent gazu – wpływ całości procesu na efekt cieplarniany byłby porównywalny z elektrownią węglową. Według dostępnych danych faktyczne wycieki są jednak znacznie niższe (Marchese i Zimmerle, 2018), jednak monitoring tego zagadnienia nie jest prowadzony w sposób systematyczny, a z niektórych krajów po prostu nie ma wiarygodnych danych.

Zastępowanie węgla gazem jest z emisyjnego punktu widzenia tylko półśrodkiem, jednak w całościowo planowanej polityce energetycznej może przynieść szereg korzyści. Po pierwsze może być realizowane relatywnie szybko, bowiem wykorzystywane są w pełni dojrzałe technologie. Po drugie instalacje gazowe charakteryzują się dużo wyższą elastycznością pracy (wyrażającą się czasem uruchomienia czy szybkością możliwych zmian mocy) i dużo łatwiej budować z nich część energetyki opartą o paliwa kopalne i współpracującą ze źródłami odnawialnymi. Sprawia to, że wprowadzanie do bilansu energetycznego pewnych mocy gazowych może być sposobem na przyspieszanie redukcji emisyjności tych systemów, które oparte są w dużej mierze o węgiel. Przykładem kraju, w którym przyniosło to wyraźny skutek, jest Wielka Brytania.



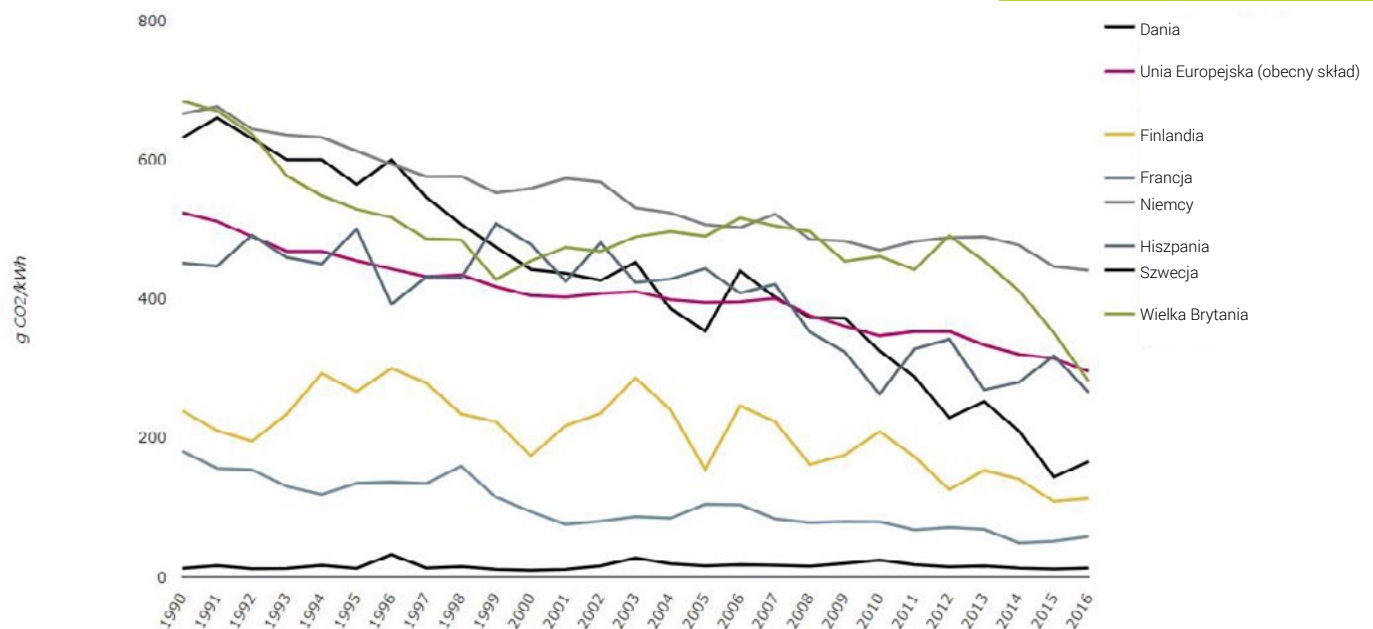
Photo by Appolinary Kalashnikova on Unsplash

AKTUALNE TRENDY I PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

W chwili obecnej paliwa kopalne pozostają daleko najistotniejszym źródłem wykorzystywanym do produkcji energii elektrycznej w skali świata – ich udział w 2018 roku wyniósł 64%, przy czym największa jest tu wciąż rola węgla (38%). Tylko 36% energii powstaje w źródłach bezemisyjnych (BP, 2019). Co gorsza, proporcje pomiędzy paliwami kopalnymi a źródłami bezemisyjnymi pozostają na niemal niezmiennym poziomie od ponad trzech dekad (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2020). Istnieje kilka systemów energetycznych o bardzo niskiej emisyjności, jednak cechą wspólną większości z nich jest to, że swoją charakterystykę emisyjną uzyskały niejako przy okazji – ograniczanie emisji gazów cieplarnianych nie było głównym założeniem przy ich konstruowaniu. Są to przede wszystkim Brazylia, Norwegia, Paragwaj, Albania, Kostaryka czy Islandia (które zawdzięczają swój czysty miks dobremu potencjałowi rozwoju hydroenergetyki, a w przypadku Islandii także geotermii), Francja (gdzie zadziałał opisany wcześniej Plan Messmera), a także Szwajcaria, Finlandia i Szwecja

(które łączą źródła odnawialne – przede wszystkim wodne – z jądrowymi). Nieliczne są natomiast kraje, które znacznie zredukowały emisje w wyniku współcześnie prowadzonej polityki klimatycznej. Jednym z takich rzadkich przykładów jest Dania, w której uzyskano to dzięki masowemu zastosowaniu energetyki wiatrowej – i możliwości wsparcia tej integracji przez systemy krajów sąsiednich (zobacz rysunek 8). Trzeba też zwrócić uwagę, że wszystkie wymienione kraje poza Francją i Brazylią są stosunkowo małe.

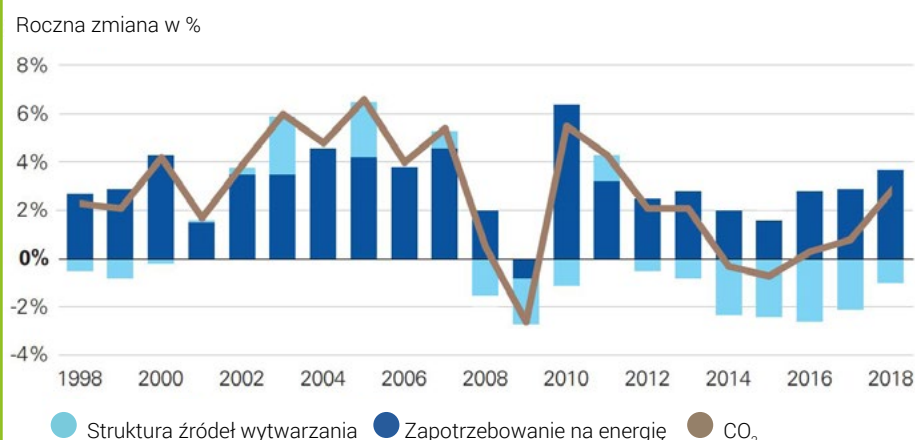
Pozytywnym sygnałem jest to, że w systemach, w których faktycznie prowadzi się aktywną politykę dekarbonizacyjną, emisje z energetyki są sukcesywnie redukowane. Narzędzia techniczne do osiągnięcia tego celu, choć niełatwe w użyciu i niedające szans na natychmiastowy efekt, istnieją i konsekwentnie stosowane mogą przynieść znaczącą poprawę. Ich optymalne zastosowanie wymaga jednak starannie zaplanowanej i konsekwentnie realizowanej polityki zarówno krajowej, jak i międzynarodowej.



Rysunek 8: Stopniowa redukcja emisyjności energetyki wybranych krajów europejskich (Europejska Agencja Środowiska, 2020).

Aktualne trendy w zakresie emisyjności energetyki w ujęciu globalnym trudno jednak uznać za optymistyczne. Emisje z energetyki wciąż rosną – mimo pewnych pozytywnych zmian miksu energetycznego, efekt wzrostu zapotrzebowania pozostaje wciąż silniejszy (zobacz rysunek 9). W praktyce wysiłki na rzecz dekarbonizacji są cały czas lokalne, a nad ich pozytywnym wpływem przeważają zjawiska takie, jak szybka budowa nowych elektrowni węglowych w Chinach czy Indiach. Sytuacji nie poprawia też niespójna polityka niektórych państw wysokorozwiniętych, w których dochodzi do zastępowania jednych

źródeł bezemisyjnych innymi przy równoczesnym zachowaniu znaczącego udziału paliw kopalnych. Przykładem takiej sytuacji może być polityka niemiecka – opisana w ramce. Wątpliwym działaniem jest także choćby budowa elektrowni wiatrowych we Francji, przy jednoczesnym odstawianiu sprawnych bloków jądrowych – te same środki wykorzystane na budowę takiej samej instalacji OZE w kraju, w którym obecnie emisyjność jest wysoka, np. w Polsce, przyniosłyby redukcję emisji.



Rysunek 9: Zmiany emisji z sektora energetycznego wynikające ze zmiany struktury źródeł (Fuel mix) oraz zmian zapotrzebowania (power demand). Widać, że za wyjątkiem lat 2009, 2014 i 2015 zmiana struktury źródeł nie wystarcza nawet do skompensowania wzrostu. Warto odnotować także, że w szeregu lat zmiany struktury wytwarzania powodowały nie spadki, a wzrosty emisji (BP, 2019).

Energiewende to polityka transformacji energetycznej wdrożona w Niemczech, która do dziś nie odniosła spektakularnego sukcesu, jeśli chodzi o ograniczanie emisji.

Gdyby Niemcy w roku po roku 1990, kiedy jedynym OZE w bilansie krajowym była hydroenergetyka o udziale 3,5%, ograniczyły swoją transformację do zastąpienia węgla i oleju opałowego gazem ziemnym, to przy bardzo konserwatywnym założeniu średniej emisyjności tych elektrowni gazowych na poziomie 500 g/kWh (nowoczesne bloki przy pełnej mocy schodzą w rzeczywistości poniżej 400) dziś emisyjność energetyki wynosiłaby ok. 345 g/kWh. Gdyby tak samo postąpiono w 2000 roku, byłoby to 310 g/kWh (dane wyjściowe według Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019, zobacz rysunek 10). Tymczasem w rzeczywistości do roku 2016 faktyczny wskaźnik wyniósł 441 g/kWh (Europejska Agencja Środowiska, 2020), mimo olbrzymiego wysiłku w zakresie rozwoju źródeł odnawialnych.

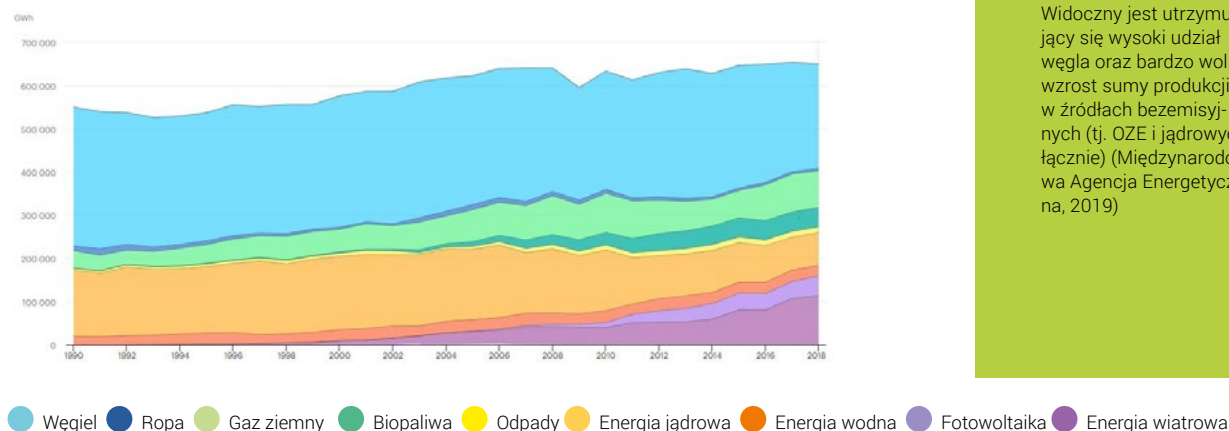
Jest tak dlatego, że szybkiemu rozwojowi OZE w Niemczech towarzyszy utrzymanie wysokiego udziału węgla (i nie chodzi tu tylko o utrzymywanie starych elektrowni węglowych – aż 10 289 z 32 595 MW mocy zainstalowanej w czynnych niemieckich elektrowniach węglowych to instalacje uruchomione już w XXI wieku (Bundesnetzagentur, 2020)), a dodatkowo także odstawianie elektrowni jądrowych. W ten sposób potencjał redukcji emisji CO₂ stworzony przez integrację źródeł odnawialnych jest w sporej części marnowany. Pod tym względem polityce niemieckiej można przeciwstawić sytuację w Wielkiej Brytanii, gdzie szybkiemu rozwojowi OZE towarzyszy utrzymanie energetyki jądrowej i sukcesywne zastępowanie węgla gazem ziemnym.

PRZYKŁAD

Oczywiście nie znaczy to, że niemiecka polityka klimatyczna nie przynosi żadnych efektów – efekt redukcji emisji od roku 1990 (gdy emisyjność wynosiła 526 g/kWh) jest widoczny. Bardzo ważny jest też wkład Niemiec w upowszechnienie i dopracowanie technologii OZE, z którego obecnie korzystają także inne kraje (wyraża się to m.in. spadkiem cen instalacji). Niemniej trudno niemiecką politykę w zakresie miksów uznać całość za optymalną z emisyjnego punktu widzenia, a niektóre działania – takie jak wyłączanie sprawnych elektrowni jądrowych przy jednoczesnym utrzymywaniu w ruchu pełniących tę samą funkcję systemową elektrowni węglowych – należy wprost nazwać szkodliwymi.

Rysunek 10: Struktura wytwarzania energii elektrycznej w Niemczech w latach 1990–2018.

Widoczny jest utrzymujący się wysoki udział węgla oraz bardzo wolny wzrost sumy produkcji w źródłach bezemisyjnych (tj. OZE i jądrowych łącznie) (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019)



W obliczu zmiany klimatu **transformacja energetyczna jest koniecznością**. Niestety poważnym problemem ograniczającym skuteczność prowadzonej obecnie polityki klimatyczno-energetycznej, jest próba rozwiązywania problemu globalnego w ramach polityk krajowych. Prowadzi to do sytuacji, w której w jednych krajach realizowane są ambitne (i kosztowne) scenariusze uzyskiwania bardzo wysokiego udziału źródeł bezemisyjnych, podczas gdy w innych tych źródeł niemal nie ma, a ich wdrażanie byłoby dużo prostsze technicznie i przez to tańsze.

Zmiana tego stanu rzeczy wymagałaby znacznie ściślejszej koordynacji działań na poziomie międzynarodowym, co jest tematem daleko wykraczającym poza ramy tego rozdziału. Jak już wiesz, z rozdziałów wcześniejszych dotyczących ekonomii i dóbr wspólnych, redukcja emisji gazów cieplarnianych jest w szerszym sensie przykładem dylematu dotyczącego dóbr wspólnych, czyli tragedii wspólnego pastwiska (patrz lekcja 5.). **Takie dylematy mogą być niestety rozwiązane jedynie w drodze długotrwałego planowania, regulacji i wiążącej współpracy pomiędzy wszystkimi stronami. Jednocześnie wsparcie ze strony technologii i inżynierii, łącznie z inwestycjami w badania naukowe i tworzenie nowych technologii, oraz powtórne ożywienie niektórych starszych technologii, będzie niezbędne, jeśli ograniczenie zmiany klimatu ma się powieść. W ostatecznym rozrachunku transformacja energetyczna jest problemem nie tylko technologicznym i inżynierskim, ale społecznym i politycznym.**

**WSKAZÓWKI
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Smog a zmiana klimatu

Problem zmiany klimatu i emisji gazów cieplarnianych jest często mieszany lub mylony ze smogiem, czyli problemem złej jakości powietrza, którym oddychamy. Są to jednak dwa różne, choć mocno ze sobą związane problemy. W dodatku z czasem związki i zależności między nimi mogą być coraz silniejsze.

CO TO JEST SMOG?

„Smog” to zbitka angielskich słów: „*smoke*” (dym) i „*fog*” (mgła). Przy odpowiedniej pogodzie dymy z kominów i spaliny z rur wydechowych tworzą specyficzną mieszaninę, taką właśnie „dymo-mgłę”.

Ale powietrze jest mniej lub bardziej zanieczyszczone przez cały rok, nawet wtedy, gdy nie ma typowego smogu zimowego („londyńskiego”) lub letniego (fotochemicznego). Słowo „smog” jest już dziś po prostu wygodnym synonimem dla zanieczyszczeń powietrza, które mają bezpośredni wpływ na nasze samopoczucie, zdrowie i życie.

O jakie zanieczyszczenia tu chodzi? Przede wszystkim o tzw. pył zawieszony (często spotykane skróty $PM_{2,5}$, PM_{10} , od ang. *particulate matter*) wraz ze wszystkimi szkodliwymi substancjami, które się w pyłe znajdują, np. benzo[a]pirenem (Juda-Rezler i in., 2016).

Pył zawieszony mogą tworzyć unoszące się w powietrzu maleńkie drobinki sadzy pochodzące z kominów lub rur wydechowych. Mogą to być również bardzo małe ziarenka piasku, a ostatnio nawet kawałeczki plastiku. Ale cząstki (nie cząsteczki!) pyłu mogą się składać również z wielu innych substancji (Juda-Rezler i in., 2016). Takie cząstki są bardzo małe – kilka, a nawet kilka tysięcy razy mniejsze niż średnica (grubość) ludzkiego włosa. Liczby przy skrótach PM ($PM_{2,5}$, PM_{10} , PM_1 itd.) oznaczają maksymalną średnicę cząstek pyłu wyrażoną w mikrometrach (ściślej mówiąc, chodzi o tzw. średnicę aerodynamiczną).

Wśród „składników smogu” oprócz pyłu mamy też m.in. dwutlenek azotu (NO_2), dwutlenek siarki (SO_2), ozon (O_3), tlenek węgla (CO) i tzw. lotne związki organiczne (LZO) – na przykład niedopalone składniki benzyny (Vallero, 2008).

Jak widać, na tej liście nie ma dwutlenku węgla (CO_2), metanu (CH_4) ani podtlenku azotu (bardziej poprawnie: tlenku azotu(I), N_2O , nie mylić z dwutlenkiem azotu, czyli tlenkiem azotu(IV), NO_2) – trzech najważniejszych gazów cieplarnianych emitowanych przez człowieka.



CZY WIESZ, ŻE ?

Jakość powietrza w Polsce jest wyraźnie gorsza niż w krajach Europy Zachodniej. W sezonie grzewczym stężenia pyłu zawieszonego ($PM_{2,5}$, PM_{10}) są u nas zwykle wysokie lub bardzo wysokie – znacznie przekraczają nie tylko maksymalne poziomy rekomendowane przez Światową Organizację Zdrowia, ale i łagodniejsze normy wynikające z prawa unijnego (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska; Juda-Rezler i in., 2016).

Niewiele lepiej jest w Polsce z zanieczyszczeniem powietrza dwutlenkiem azotu, którego źródłem są przede wszystkim silniki spalinowe. Z kolei problem z ozonem jest w naszym kraju mniejszy niż na południu Europy. Jednak przy dużym nasłonecznieniu także w Polsce ozon może występować w stężeniach, które nie są obojętne dla naszego zdrowia.

Fizycy atmosfery zamiast „pyły zawieszone” wolą używać terminu „aerozole”.

DLACZEGO PROBLEM JAKOŚCI POWIETRZA MOŻE SIĘ NAM MYLIĆ Z PROBLEMEM ZMIAN KLIMATYCZNYCH?

Gazy cieplarniane i substancje składające się na smog mogą się nam mylić. Choćby dlatego, że wszystkie wymienione tu „składniki smogu” mają jakiś wpływ na klimat (Myhre i in., 2013). Jedne podgrzewają naszą planetę (np. ozon – ważny gaz cieplarniany czy wchodząca w skład pyłu i ocieplająca klimat sadza), inne chłodzą (dwutlenek siarki, a raczej powstające z niego aerozole siarczanowe). Jeszcze inne nie wpływają na klimat bezpośrednio, ale substancje powstające z nich w różnych reakcjach chemicznych już tak. Na przykład z dwutlenku azotu i innych związków chemicznych pod wpływem promieniowania słonecznego powstaje ozon.

Między innymi dlatego walka ze smogiem może, ale wcale nie musi, pomagać klimatowi. Na przykład radykalne zmniejszenie emisji powodującego kwaśne deszcze dwutlenku siarki, choć korzystne dla naszego zdrowia, ekosystemów i zabytków, przyspieszyło zmianę klimatu!



Photo by Alexander Popov on Unsplash

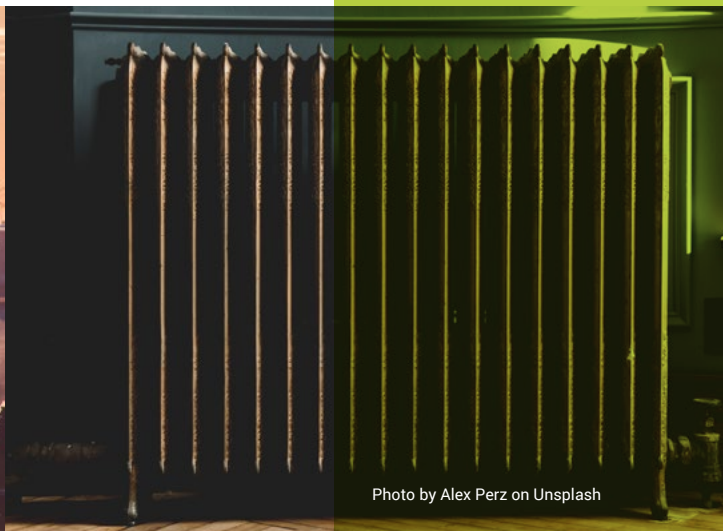


Photo by Alex Perz on Unsplash

WSPÓLNE ŹRÓDŁA

Dwutlenek węgla i substancje tworzące smog mają w dużej mierze wspólne źródła: spalanie paliw kopalnych (węgla, pochodnych ropy naftowej i gazu ziemnego) oraz biomasy.

Jednak w Polsce za smog odpowiadają przede wszystkim domowe paleniska – ogrzewanie naszych – domów oraz transport – silniki spalinowe. W mniejszym zaś stopniu przemysł i energetyka. Z gazami cieplarnianymi jest z grubsza na odwrót: największe źródło emisji CO₂ to energetyka – elektrownie i elektrociepłownie, mimo że transport i ogrzewanie mają tu też znaczny udział.

Bo choć to elektrownie i elektrociepłownie spalają większość zużywanego w Polsce węgla kamiennego i prawie cały węgiel brunatny (a także coraz więcej gazu ziemnego) i emitują ogromne ilości CO₂, (ok. połowy całej polskiej emisji tego gazu!), to jednak w przeciwieństwie do domowych palenisk są wyposażone w coraz lepsze instalacje zmniejszające emisje pyłu, tlenków azotu i siarki. Ich wpływ na powstawanie smogu jest więc stosunkowo niewiel-

ki, ale za to na klimat – bardzo duży. I właśnie dlatego działacze antysmogowi mówią głównie o domowych piecach i kotłach na węgiel i drewno oraz o samochodach, a osoby zajmujące się walką ze zmianą klimatu koncentrują się na elektrowniach węglowych.

ŁATWIEJ PORADZIĆ SOBIE ZE SMOGIEM NIŻ POWSTRZYMAĆ ZMIANĘ KLIMATU

Dlaczego? Bo węgiel kamienny i brunatny, ropę naftową, gaz ziemny i biomasę można spalać tak, by nie powodować smogu. Da się to zrobić, używając nowoczesnych urządzeń grzewczych i silników spalinowych, a także stosując różnego typu filtry, katalizatory i inne rozwiązania techniczne, tak jak to ma miejsce na przykład w zawodowej energetyce – elektrowniach i elektrociepłowniach. Czasem wystarczy po prostu zamiana innych paliw na gaz ziemny, używany do ogrzewania naszych domów lub do produkcji energii elektrycznej (zamiast węgla i biomasy) oraz w silnikach spalinowych (zamiast oleju napędowego).

PRAW CHEMII NIE DA SIĘ OSZUKAĆ

W skład paliw kopalnych i biomasy wchodzi przecież węgiel (tu w znaczeniu: szósty pierwiastek układu okresowego). I dlatego przy ich spalaniu zawsze powstaje dwutlenek węgla. Jeśli spalanie jest całkowite, każdy atom węgla łączy się z dwoma atomami tlenu. Z każdego kilograma pierwiastkowego węgla zawartego w spalanej substancji powstaje wtedy ok. 3.66 kg CO₂. Jeśli spalanie nie jest całkowite, to powstanie troszkę mniej CO₂, ale „za to” części pierwiastkowego węgla zawartego w paliwie wejdzie w skład tlenku węgla (CO), lotnych związków organicznych (LZO) czy też sadzy – ważnych składników smogu.

Emisji CO₂ związanej ze spalaniem paliw kopalnych lub biomasy nie da się więc zmniejszać tak, jak da się obniżyć (w idealnym przypadku do zera) emisję pyłu, LZO, tlenków siarki czy azotu. To nie jest kwestia jakości paliwa, techniki spalania czy oczyszczania spalin, tylko praw przyrody.

GAZ ZIEMNY JEST BARDZO NIEBEZPIECZNY DLA KLIMATU

Także dlatego z punktu widzenia ochrony klimatu zamiana innych paliw kopalnych na gaz ziemny nie jest akceptowalnym rozwiązaniem, choć z punktu widzenia walki ze smogiem jest to rozwiązanie bardzo dobre. Ale jest jeszcze inny powód, dla którego ten nośnik energii jest bardzo szkodliwy dla klimatu. Gaz ziemny składa się głównie z metanu (CH₄) – najważniejszego po CO₂ gazu cieplarnianego. I choć emisje CO₂ na jednostkę energii uzyskaną ze spalania gazu są mniejsze niż w przypadku węgla lub ropy naftowej (ale wciąż duże), to nie wolno nam też zapominać o wyciekach gazu ziemnego podczas jego wydobycia, transportu i składowania. Dlatego w zależności od wielkości wycieków wpływ na klimat, jaki ma używanie gazu ziemnego jako nośnika energii, może być równie duży, a nawet większy niż wpływ spalania węgla (w przeliczeniu na jednostkę energii). Jest to prawdą przynajmniej w perspektywie kluczowych dla nas najbliższych 20–30 lat (z czasem metan utlenia się do dwutlenku węgla, więc jego wpływ na klimat maleje).

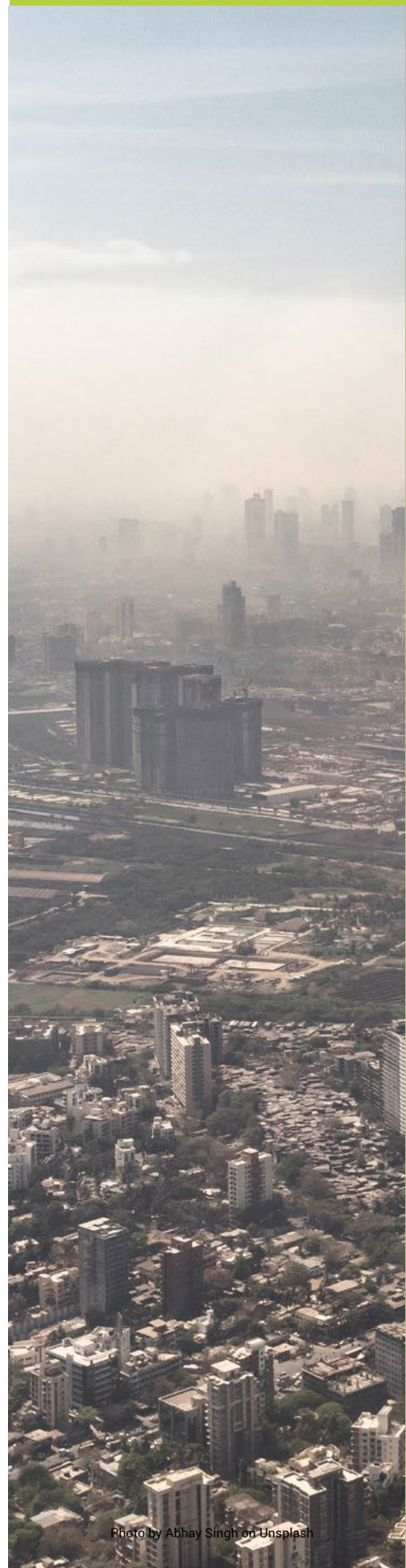


Photo by Abhay Singh on Unsplash

ZMIANA KLIMATU JEST NIEPORÓWNYWALNIE WIĘKSZYM WYZWANIEM NIŻ SMOG

Teraz dobrze widać, dlaczego smog jest dla nas mniejszym wyzwaniem niż zmiana klimatu. A także dlaczego działania antysmogowe nie zawsze pomagają klimatowi. **Żeby oczyścić powietrze ze smogu, nie trzeba rezygnować ze spalania paliw kopalnych i biomasy – wystarczy spalać je „czysto”.** Jednak by spowolnić zmianę klimatu, by uchronić się przed katastrofą klimatyczną, potrzebne są dużo bardziej radykalne kroki: musimy w ogóle przestać korzystać z paliw kopalnych jako źródła energii. Albo robić to tak, by nie emitować powstającego przy ich spalaniu dwutlenku węgla do atmosfery (sekwestracja dwutlenku węgla, ang. *carbon capture and storage*, CCS). Jest to trudne technicznie i kosztowne, a poza pilotażowymi instalacjami nie bywa obecnie stosowane.

Poza tym, jeśli tylko przestaniemy emitować „składniki smogu” takie jak pył, tlenki azotu czy siarki, to powietrze oczyści się z nich samo, bez naszej ingerencji. W dodatku stanie się to szybko – w ciągu dni, najdalej miesięcy.

OCZYSZCZENIE ATMOSFERY Z NADMIARU DWUTLENKU WĘGLA JEST BARDZO TRUDNE

Z dwutlenkiem węgla już tak prosto nie jest – wyemitowany do atmosfery trafia do tzw. szybkiego cyklu węglowego i krąży między atmosferą, biosferą, i oceanami, wpływając na klimat naszej planety przez tysiące lat – dopóki nie zostanie trwale usunięty w tzw. wolnym cyklu węglowym. By przywrócić atmosferę do stanu pierwotnego (czyli tego sprzed rewolucji przemysłowej), trzeba więc aktywnie usuwać CO₂ bezpośrednio z powietrza (ang. *direct air capture*). Co podobnie jak sekwestracja dwutlenku węgla (CCS) jest i kosztowne, i trudne technicznie. Ale jest też niestety niezbędne, jeśli mamy mieć jakiegokolwiek szanse na uchronienie się przed katastrofą klimatyczną.

Z kolei średni czas życia cząsteczki metanu w powietrzu to ok. 10 lat – znacznie krócej niż w przypadku dwutlenku węgla, ale znacznie dłużej niż w przypadku „składników smogu”.

CO JESZCZE MAJĄ WSPÓLNEGO SMOG I ZMIANA KLIMATU?

Pożary lasów

Związków między smogiem a zmianą klimatu jest więcej. Konsekwencją zmian klimatycznych są na przykład częstsze i potężniejsze pożary lasów, a te bardzo pogarszają jakość powietrza. Dobrze było widać to w Australii, a nieco wcześniej w Brazylii w związku z pożarami lasów Amazonii. Wpływ pożarów lasów na jakość powietrza to zresztą dobrze znany problem. Okresowe wypalanie lasów w Malezji i Indonezji od lat powodują smog w Singapurze. Dekadę temu potężne pożary lasów i torfowisk spowiły gęstym dymem Moskwę.

Wysokie stężenia CO₂ mają bezpośredni wpływ na nasze samopoczucie

Innym wspólnym punktem problemu jakości powietrza i problemu zmian klimatycznych jest to, że rosnące stężenie CO₂ w atmosferze zacznie niedługo bezpośrednio wpływać na nasze zdrowie i samopoczucie. A w szczególności na sprawność intelektualną, koncentrację i uwagę. Takie efekty można

WSKAZÓWKA NA PRZYSZŁOŚĆ



CZY WIESZ, ŻE?

Stan powietrza w Polsce poprawił się trochę w ostatnich latach – średnie stężenia pyłu zawieszonego spadają z roku na rok. Ma to związek przede wszystkim z coraz krótszym i cieplejszym sezonem grzewczym, a nie z celowymi działaniami antysmogowymi (wyjątkiem jest tu Kraków, w którym zlikwidowano ogromną większość palenisk na węgiel i drewno). Dużo cieplejsza, a często i bardziej wietrzna pogoda w sezonie grzewczym, to z kolei bezpośrednia konsekwencja zmiany klimatu. Cieszyć się jednak z tego powodu nie należy. Nie dość, że wynikająca ze zmiany klimatu poprawa jakości powietrza nie jest duża, to w dodatku negatywne skutki zmian klimatycznych są znacznie poważniejsze niż nieliczne ich pozytywne konsekwencje.



O szybkim i wolnym cyklu węglowym wiesz z lekcji 3. naszego ABC.

zaobserwować w zatłoczonych, dusznych, niewietrzonych pomieszczeniach już przy stężeniach CO_2 wynoszących ok. 600 – 700 ppm (części lub cząsteczek na milion) (Fisk i in., 2013; Jacobson i in., 2019; Satish i in., 2012). Tu jednak mówimy o powietrzu zewnętrznym, w którym tzw. stężenie tła dla dwutlenku węgla już obecnie sięga 418 ppm i stale rośnie (z dokładnością do sezonowych wahań związanych z okresem wegetacyjnym na półkuli północnej). Jeśli nie ograniczymy emisji CO_2 , to już za kilka dekad stężenie tego gazu w atmosferze w dowolnym miejscu planety przekroczy 600 ppm. Nawet przy niższych stężeniach CO_2 w powietrzu zewnętrznym coraz trudniej będzie nam wietrzyć budynki, by utrzymać w nich wystarczająco dobrą jakość powietrza.

W dodatku stężenie tła mierzymy z dala od źródeł emisji dwutlenku węgla, na przykład na środku Oceanu Spokojnego (Mauna Loa). W miastach, gdzie mamy dużo różnych źródeł CO_2 – silniki spalinowe i domowe lub przemysłowe paleniska – stężenia tego gazu w niektórych miejscach i porach doby już dziś przekraczają 600 ppm. Choć na razie mówiąc o smogu, zwykle nie wspominamy o dwutlenku węgla, to chyba już najwyższy czas zacząć to robić.

**Więcej na ten temat w artykule:**

Homo sapiens w świecie wysokich stężeń CO_2 »



To zjawisko nazywane jest „miejską czapą CO_2 ” (ang. *CO_2 urban dome*).

Niekompletną, ale dość obszerną listę prac na ten temat można znaleźć na stronie Carbon Dioxide. »

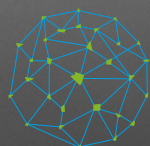
**CZY WIESZ, ŻE ?**

Smog jest w Polsce problemem, którego z pewnością nie należy lekceważyć.



Szacuje się, że z powodu złej jakości powietrza co roku przedwcześnie umiera w naszym kraju ponad 40 tysięcy osób (Europejska Agencja Środowiska, 2019). Poza skróceniem oczekiwanej długości życia zanieczyszczenia powietrza wywołują lub nasilają objawy wielu chorób układu oddechowego, układu krążenia a nawet układu nerwowego. Szczególnie narażone są osoby w wieku podeszłym, ale silny jest też wpływ zanieczyszczeń powietrza na dzieci. Także na te jeszcze nienarodzone – podobnie jak w przypadku wielu innych szkodliwych substancji obecnych w środowisku (np. dym tytoniowy, metale ciężkie, niektóre środki ochrony roślin), ekspozycja na typowe zanieczyszczenia powietrza w okresie prenatalnym może mieć bardzo negatywny wpływ na rozwój dziecka.





KLIMATYCZNE
ABC

MAGDALENA BUDZISZEWSKA
ZBIGNIEW BOHDANOWICZ
ALEKSANDRA KARDAŚ
BEATA ŁOPACIUK-GONARCZYK
WIKTOR KOTOWSKI
SZYMON MALINOWSKI
ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

Działania ograniczające zmianę klimatu

– przyroda, gospodarka i społeczeństwo

W ostatnim rozdziale klimatycznego ABC opowiadamy o możliwych rozwiązaniach mitygacyjnych i adaptacyjnych związanych z przyrodą, gospodarką i społeczeństwem.

W zakresie ochrony przyrody i gospodarowania ziemią, w tym także rolnictwa, istnieje wiele działań, które mogą zarówno pomóc przystosować się ludziom do zmiany klimatu, jak i pomóc ją ograniczyć. Nie zastąpią one działań omawianych w poprzednim rozdziale, zwłaszcza transformacji energetycznej i redukcji emisji gazów cieplarnianych ze wszystkich sektorów gospodarki. Jednak mogą je uzupełnić i dać ludziom więcej czasu na poradzenie sobie z wyzwaniem.

W sferze społecznej, w sferze ekonomii, wreszcie w sferze indywidualnych działań jednostek i działań obywatelskich leży klucz do wspierania całego procesu przekształcania wszystkich sfer ludzkiej działalności mających wpływ na klimat. Opisujemy je kolejno, nadając tym podrozdziałom charakter problemowy i zapraszając czytelnika do samodzielnego myślenia. W sferze ekonomicznej i społecznej nadal nie wprowadzamy w życie skutecznych rozwiązań ograniczających zmianę klimatu w skali odpowiedniej do powagi sytuacji. Dlatego ważne jest, aby działać w kierunku przezwyciężenia trudności organizacyjnych, politycznych, kulturowych i poprzez skoordynowane działania zredukować emisje w skali całej planety, a jednocześnie realizować przemyślane i skuteczne zabiegi adaptacyjne.

Na zakończenie polecamy państwu dwa dodatkowe teksty. Jeden z nich to krótki materiał podsumowujący w pytaniach i odpowiedziach podstawowe fakty o zmianie klimatu i najczęstsze nieporozumienia.

Drugi z nich to polskie tłumaczenie pełnego tekstu artykułu: **Naukowcy z całego świata ogłaszają klimatyczny stan wyjątkowy**, który ukazał się w czasopiśmie „BioScience” na przełomie 2019 i 2020 roku. William Ripple wraz z współautorami i ponad 11 tysiącami naukowców sygnatariuszy z ponad 150 krajów podsumowują niebezpieczeństwo kryzysu klimatycznego i syntetycznie omawiają sześć najważniejszych obszarów, w których należałoby dokonać zmian. Są to: energia, zanieczyszczenia krótkotrwałe, przyroda, żywność, gospodarka i populacja. Polecamy lekturę tego tekstu, ponieważ odzwierciedla on, bez wchodzenia w szczegóły, rodzaj konsensusu w niełatwej i często dyskusyjnej sferze rozwiązań. Warto zwrócić uwagę, że rozwiązania w jednej tylko dziedzinie nie wystarczą. Musimy dokonać tych zmian we wszystkich wymienionych obszarach.



Oryginalna wersja artykułu dostępna jest [tutaj »](#)

A polskie tłumaczenie artykułu [tutaj »](#)

Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – rozwiązania ekonomiczne

Czy zwróciłeś uwagę, że wiele firm czy polityków, podejmujących bardzo szkodliwe dla środowiska decyzje, jednocześnie chętnie prowadzi kampanie „ekologiczne”, w których namawia ludzi do sprzątania lasu czy sortowania śmieci? Kiedy jednak rozmawiamy o śmieceniu w lesie, o tym, czy inni ludzie, a nawet my sami, poprawnie sortujemy śmieci, często zapominamy o innych – bardzo ważnych – kwestiach. Przykładowo, co dzieje się ze śmieciami po posortowaniu? Jak zorganizowano dalsze etapy recyklingu? Jaki jest ich rzeczywisty sens i koszt środowiskowy? A przede wszystkim dlaczego produkcja zbędnych opakowań w tak dużych ilościach jest w ogóle możliwa i co gorsza o wiele tańsza od ich późniejszej utylizacji? Czy można by – zamiast skupiać się na recyklingu – mniej ich produkować? Albo chociaż sprawić, aby ta produkcja nie była aż tak tania? Co by się zdarzyło, gdyby konsekwentnie stosować zasadę „zanieczyszczający płaci”, a koszt środowiskowy śmieci nie byłby ukryty, lecz odzwierciedlony w cenie?

Są to bardzo dobre pytania, choć odpowiedzi nie są wcale łatwe ani jednoznaczne. **Wreszcie, jaki jest związek śmieci z klimatem i dlaczego żadna ilość recyklingu nie rozwiąże problemu kryzysu klimatycznego? W tym celu musimy przede wszystkim przestać spalać paliwa kopalne!**

W tym rozdziale omówimy rozwiązania ekonomiczne i prawne, dzięki którym można skutecznie ograniczyć ilość paliw kopalnych wykorzystywanych przez gospodarkę (tzw. mitygacja zmiany klimatu), oraz działania, które pomogą nam się przygotować na nadchodzące zmiany (tzw. adaptacja do zmiany klimatu).

MITYGACJA ZMIANY KLIMATU

Jak wiesz z pierwszego rozdziału tej lekcji, najistotniejszym elementem scenariuszy pozwalających na zatrzymanie zmiany klimatu jest znaczące ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. W tym rozdziale skoncentrujemy się na rozwiązaniach, które pozwoliłyby to zrealizować, takich jak generowanie energii z niskoemisyjnych źródeł, podnoszenie efektywności energetycznej i zmiany w różnych działach produkcji przemysłowej i rolniej, w transporcie oraz w zachowaniach konsumenckich. Narzędzia służące do mitygacji zmian klimatycznych zostaną przedstawione w kontekście działań podejmowanych przez UE w celu osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. UE podejmuje najwięcej inicjatyw, aby ograniczyć emisyjność gospodarki, ale podobne rozwiązania są wprowadzane również w innych rejonach świata.

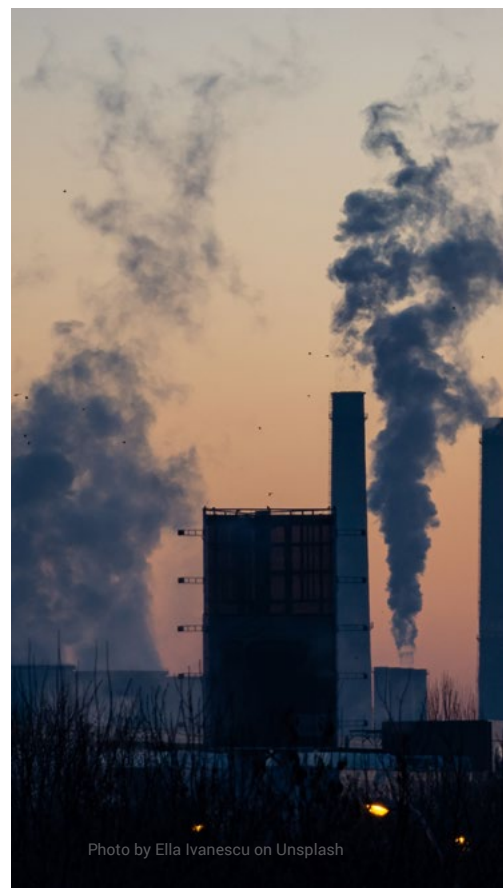


Photo by Ella Ivanescu on Unsplash

Unia Europejska poważnie traktuje cele, wspomnianego już na początku tej lekcji, Porozumienia paryskiego i na ich podstawie tworzy rozwiązania prawne oraz strategię rozwoju na kolejne dziesięciolecia. Obecnie UE dąży do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 40% do roku 2030 i do osiągnięcia pełnej neutralności klimatycznej do roku 2050. Takie cele zostały ustalone w listopadzie 2019 roku w trakcie szczytu liderów UE i zostały podpisane przez wszystkie kraje członkowskie z wyjątkiem jednego – Polski.

Polski rząd argumentował, że w przypadku naszego kraju osiągnięcie neutralności klimatycznej nie jest możliwe, ze względu na duże wykorzystanie węgla w gospodarce i plany intensywnego korzystania z tego źródła energii w przyszłości.

Niezależnie od postawy Polski decyzję uchwalono i UE dąży do jej realizacji.

Za pomocą jakich rozwiązań, regulacji i działań taki cel ma zostać osiągnięty?

Szereg działań, które UE ma zamiar zrealizować, można pogrupować w trzy duże kategorie, które omówimy bardziej szczegółowo w dalszej części lekcji:

- **opodatkowanie emisji dwutlenku węgla,**
- **poprawa efektywności energetycznej,**
- **transformacja energetyczna w kierunku niskoemisyjnych źródeł energii.**

Opodatkowanie emisji dwutlenku węgla

Pomysł, aby opodatkować emisje dwutlenku węgla, ma źródło w teorii ekonomii, według której negatywne efekty zewnętrzne związane z działalnością gospodarczą (np. zanieczyszczenie powietrza, hałas) należy ograniczać, obciążając kosztami podmioty, które je generują, według zasady „zanieczyszczający płaci”. Ogólnie, podatki, które mają zmniejszać efekty zewnętrzne nazywane są „podatkami Pigou”, od nazwiska ekonomisty (Arthur Pigou), który jako jeden z pierwszych zajmował się tym zagadnieniem.

W UE paliwa kopalne używane do transportu lub ogrzewania są obciążone podatkiem akcyzowym, jednak nie jest to podatek związany z poziomem emisji, lecz z zawartą w paliwie energią. Jest to jedyny widoczny dla indywidualnych odbiorców podatek obciążający te paliwa.

Ponadto w UE obowiązuje Europejski **System Handlu Emisjami** (EU ETS), który nakłada na przedsiębiorstwa emitujące znaczne ilości gazów cieplarnianych obowiązek pokrywania tych emisji odpowiednimi pozwoleniami. Jest to mechanizm działający według zasady „**Cap & Trade**” – całkowity poziom emisji CO₂ z gospodarki regulowany jest przez łączną ilość pozwoleń, którymi podmioty podlegające regulacjom systemu mogą swobodnie handlować. W tym systemie emisje redukowane są poprzez stopniowe zmniejszanie ilości dostępnych na rynku pozwoleń. Zaletą tego rozwiązania jest to (jeśli działa prawidłowo), że dzięki możliwości handlu pozwoleniami emisje są redukowane w tych przedsiębiorstwach, w których koszt redukcji jest najmniejszy. Pokażemy to na przykładzie. Załóżmy, że dochodzi do transakcji pozwoleniem na emisję: przedsiębiorstwo A oferuje na sprzedaż pozwolenie na emisję tony CO₂ za kwotę 50 zł, a przedsiębiorstwo B takie pozwolenie kupuje. Przedsiębiorstwo A powinno wystawić takie pozwolenie na sprzedaż tylko w sytuacji, gdy wie, że jest w stanie obniżyć własne emisje o tonę CO₂ za mniejszą kwotę niż 50 zł uzyskane ze



Na tej stronie można pobrać prezentację opisującą strategię osiągnięcia neutralności klimatycznej w Unii Europejskiej do 2050 roku.

Dostępna jest również wersja w języku polskim. »



**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**



ARTHUR PIGOU
(1877–1959)

Brytyjski ekonomista, prekursor neoklasycznej ekonomii dobrobytu, stworzył podstawy analizy uzasadniającej interwencję państwa ze względu na zjawisko tzw. efektów zewnętrznych, poprzez wprowadzenie opodatkowania, znanego obecnie jako „podatek Pigou”.

sprzedaży pozwolenia. Wtedy powinno obniżyć emisje i sprzedać pozwolenie, bo w ten sposób odniesie korzyść finansową. Natomiast przedsiębiorstwo B kupuje pozwolenie za 50 zł, bo w jego przypadku koszt redukcji emisji jest wyższy od kosztu pozwolenia.

Wprowadzony w UE w 2005 roku mechanizm przez długi czas w praktyce nie był skuteczny. Ceny pozwoleń były bardzo niskie, ponieważ w chwili uruchomienia systemu przydzielono zbyt duże ilości pozwoleń (które były przydzielane zgodnie z potrzebami deklarowanymi przez przedsiębiorstwa), co spowodowało, że większość firm miała znacznie więcej pozwoleń na emisję, niż potrzebowała, natomiast niewiele firm chciało je kupić. Ponadto relatywnie łatwo było uzyskać dodatkowe przydziały uprawnień, wykorzystując luki prawne. W trakcie obowiązywania systemu EU ETS był on stopniowo reformowany, dzięki czemu jego skuteczność się poprawiała. Istotna zmiana nastąpiła w 2018 roku, gdy ceny pozwoleń znacząco wzrosły do poziomu, który stał się istotnym kosztem dla największych emiterów dwutlenku węgla. Według prognoz ceny pozwoleń będą dalej rosnąć w przyszłości, można więc spodziewać się, że mechanizm ten będzie skuteczniej hamować poziom emisji. Dużym ograniczeniem EU ETS jest to, że obejmuje tylko największe firmy (około 11.000 podmiotów), które odpowiadają za około połowę emisji CO₂ w UE. Pytanie, jakim mechanizmem zachęcać do rezygnowania z paliw kopalnych odbiorców indywidualnych i mniejsze firmy, pozostaje otwarte.

Jako działanie ograniczające emisje gazów cieplarnianych często wymienia się ograniczenie latania samolotami (o tym, czemu ich wpływ na klimat jest istotny, pisaliśmy w lekcji 4). Jednocześnie ograniczenie podróży samolotem jest dla wielu ludzi trudne, szczególnie gdy okazuje się, że jest to tańszy środek transportu niż pociąg czy samochód.

Należałoby zacząć rozmawiać o tym, dlaczego latanie samolotem jest tak tanie? Wynika to z faktu, że paliwa lotnicze nie są obciążone akcyzą, na skutek czego latanie jest zazwyczaj nie tylko szybsze, ale i tańsze od pokonania tej samej trasy inną metodą. W tej sytuacji tylko osoby posiadające więcej czasu i pieniędzy lub bardzo zdeterminowane są w stanie ograniczyć korzystanie z podróży lotniczych.

Ciekawym sposobem na ograniczenie emisji CO₂ jest proponowany przez Jamesa Hansena **podatek w formule „Fee & 100% dividend”** (Opłata i 100% dywidendy). Mechanizm tego rozwiązania jest bardzo prosty. Wszystkie emisje dwutlenku węgla obciążone są kwotą, która stopniowo wzrasta, zgodnie z góry ustalonym planem. Powoduje to wzrost cen towarów i usług o wartość podatku od emisji CO₂, w stopniu proporcjonalnym do emisji związanych z wytworzeniem danego produktu lub usługi. Do tej pory to rozwiązanie nie różni się jeszcze niczym od innych podatków, które znamy.

Wyjątkowe w tej propozycji jest to, co dzieje się z pieniędzmi zebranymi za pomocą tego podatku. Cała kwota jest dzielona na równe części i – po odliczeniu symbolicznych kosztów administracyjnych – przekazywana wszystkim obywatelom danego kraju. Dzięki temu osoby, które poprzez swoją konsumpcję

Photo by Sacha Verheij on Unsplash



Artykuł o podatku w formule „Fee & 100% dividend”:

James Hansen, Environment and Development Challenges: The Imperative of a Carbon Fee and Dividend »

powodują mniej emisji CO₂ niż przeciętny mieszkaniec kraju, w wyniku wprowadzenia w życie tego podatku odnoszą finansową korzyść. Zatem jest to mechanizm finansowo korzystny dla większości mieszkańców – bo w największym stopniu „karana” jest relatywnie mała grupa osób, których konsumpcja powoduje ogromne emisje. Dzięki temu, że podatek najbardziej podnosi ceny tych dóbr i usług, które powodują duże emisje, zniechęca do wybierania ich, a mniej emisyjne alternatywy stają się bardziej korzystne cenowo. Dla wielu osób taki podatek może brzmieć jak utopia, ale okazuje się, że to rozwiązanie sprawdza się w praktyce. Podatek od emisji CO₂ w podobnej formie do „Fee & 100% dividend” został wprowadzony w 2008 roku w prowincji Kolumbia Brytyjska w Kanadzie oraz w całej Szwajcarii. W tych krajach zebraną kwotę podzielono – większość podatku była zwracana mieszkańcom, a pozostała część była przeznaczana na inne cele związane z ograniczaniem zmiany klimatu i wspieraniem podmiotów takich jak szkoły, szpitale czy małe firmy. Efekty były bardzo dobre, zarówno z punktu widzenia ograniczenia emisji CO₂, jak i dobrobytu ludzi. Takie wyniki spowodowały, że Kanada rozszerzyła to rozwiązanie na kolejne prowincje.

Efektywność energetyczna

Obecnie duża część zużywanej przez nas energii się marnuje. Można ją wykorzystać znacznie skuteczniej i w tym celu wprowadzane są w UE standardy wydajności energetycznej. Te przepisy wymagają, aby urządzenia domowe zużywały mniej prądu, samochody zużywały mniej paliwa, a budynki wymagały mniej energii do ich ogrzewania i chłodzenia. Według szacunków UE te działania mają poprawić efektywność energetyczną o około 30% do 2030 roku i tym samym przyczynić się do uniezależnienia gospodarki od paliw kopalnych.



Dyrektywa UE dotycząca efektywności energetycznej »

Wiele osób jest przeciwnych regulacjom narzucającym producentom coraz wyższe standardy energetyczne. Odwołują się do wyidealizowanego wyobrażenia „wolnego rynku”, argumentując, że nie wolno wchodzić w ingerować. W rozumowaniu takim zapomina się jednak, że wiele współczesnych rynków, w tym kluczowe dla kryzysu klimatycznego rynki transportu i energii oraz rynki żywności, już są rynkami wysoce uregulowanymi, na których istnieje szereg obostrzeń, podatków i dopłat. Jednak te regulacje nie służą bynajmniej uwzględnianiu efektów środowiskowych, a wręcz prowadzą do paradoksów, kiedy produkty wymagające więcej energii, zasobów i bardziej obciążające środowisko są tańsze niż te prostsze, wytworzone mniejszym nakładem energii i surowców.

Przykładem może być koszt podróży lotniczych, o czym wspominaliśmy wyżej. Innym przykładem jest to, że wyhodowane lokalnie warzywa mogą być dla konsumenta droższe od mięsa, pomimo że produkcja warzyw wymaga znacznie mniej energii. Rynek produkcji mięsa często jest traktowany jako ważny interes kraju i systemowo wspierany różnymi dopłatami. Bez nich żywność, której wyprodukowanie wymaga więcej energii i zasobów, musiałaby w rzeczywistości być droższa od takiej, której produkcja wymaga mniejszych nakładów. Można zatem powiedzieć, że uwzględnienie efektów środowiskowych nie tyle zwiększa liczbę regulacji na rynku, co zbliża rynki do takiej sytuacji, w której ich funkcjonowanie uwzględnia twardą rzeczywistość fizyczną.



Podnoszenie efektywności energetycznej to nie tylko ograniczanie ilości energii zużywanej w trakcie eksploatacji. Istotne jest spojrzenie z punktu widzenia „cyklu życia produktu”, czyli całego procesu zaczynającego się od pozyskania surowców, następnie procesu produkcji, dystrybucji, sprzedaży, a dopiero potem użytkowania i wreszcie utylizacji zużytego produktu. Wydłużenie okresu korzystania z produktu korzystnie wpływa zarówno na efektywność energetyczną (energia zużyta do produkcji jest wykorzystywana dłużej), jak i na środowisko (mniej odpadów). Dlatego od 2021 roku w UE będzie wprowadzone prawo gwarantujące konsumentom możliwość naprawiania rzeczy w ciągu minimum 10 lat od zakupu (*Right to repair*). Zgodnie z tym rozporządzeniem producent musi zapewnić dostępność części do produkowanych przez siebie urządzeń, większość elementów urządzenia ma być łatwo wymienialna, a naprawy powinny być możliwe do przeprowadzenia za pomocą standardowych, prostych narzędzi.



Strona opisująca inicjatywę „Right to Repair” »

PRZYKŁAD

Przykładem kontrowersyjnej regulacji, podnoszącej efektywność energetyczną, są bardzo wyśrubowane normy emisji dla spalin samochodowych, obowiązujące w UE. W ich wyniku wiele sprawnych, kupionych niewiele lat wcześniej aut nie może wjeżdżać do centrów dużych miast (np. Londynu czy Paryża), ponadto właściciele takich samochodów obciążeni są wyższymi podatkami. Wydawałoby się, że to prawo, jakkolwiek dotkliwe dla kierowców, skutecznie zmienia transport samochodowy na bardziej przyjazny dla środowiska i klimatu.

Okazuje się jednak, że efektem ubocznym tej regulacji jest spadek cen samochodów niespełniających nowych norm emisji i większy ich eksport do krajów, w których takie normy nie obowiązują. Biorąc zatem pod uwagę efekty zarówno w UE, jak i poza nią, okazuje się, że całkowity wpływ tej regulacji może być negatywny dla środowiska i stanu klimatu. Samochody niespełniające norm emisji w dalszym ciągu są używane, tylko w innych krajach, a w krajach UE te przepisy są impulsem zwiększającym popyt na nowe samochody, które również negatywnie wpływają na klimat i środowisko, tylko w trochę w mniejszym stopniu.

Transformacja energetyczna w kierunku niskoemisyjnych źródeł energii

Obecnie UE generuje 16% energii ze źródeł odnawialnych, a celem jest stopniowe zwiększanie tego udziału do 32% w 2030 roku aż do osiągnięcia zerowych emisji netto w 2050 roku. Realizacja transformacji energetycznej to bardzo złożone zagadnienie, które zostało szczegółowo opisane we wcześniejszym rozdziale tej lekcji, zatem w tym miejscu ograniczymy się tylko do wspomnienia aspektu finansowego.

Rozwój odnawialnych źródeł energii ogranicza zależność od paliw kopalnych, ale wymaga dotacji z budżetu państwa. Podobnie jak w przypadku regulacji wymagających podnoszenia wydajności energetycznej, zwolennikom wolnego rynku ingerencja państwa w rynek energii może się nie podobać. Jednak należy podkreślić, że obecne wsparcie (w postaci ulg, subwencji, ochrony prawnej, itp) dla sektora paliw kopalnych jest wielokrotnie większe niż środki wspierające

rozwój źródeł niskoemisyjnych. Dlatego coraz częściej pojawiają się argumenty, że aby przyspieszyć rozwój odnawialnych źródeł energii należy przede wszystkim zlikwidować lub znacząco ograniczyć regulacje chroniące sektor paliw kopalnych i przeznaczyć te środki na rozwój źródeł niskoemisyjnych. Taka decyzja spowodowałaby, że ogromne kwoty obecnie wydawane na ochronę systemu energetycznego, który przybliża nas do katastrofy klimatycznej, zostałyby skierowane na rozwój energetyki niskoemisyjnej.



Raport World Trade Institute na temat subwencji dla różnych źródeł energii w kontekście zmiany klimatu. »

OPLACALNOŚĆ ENERGETYKI JĄDROWEJ

Energia jądrowa to niskoemisyjne źródło energii, które jest elementem strategii transformacji energetycznej w UE. Opinie na temat energii jądrowej są podzielone. Część krajów uważa, że jest to niebezpieczna technologia, od której należy odchodzić, a inne twierdzą, że jej wykorzystanie jest konieczne, aby możliwe było pełne odejście od paliw kopalnych w przyszłości.

Ważnym argumentem w tej dyskusji jest ocena konkurencyjności energii jądrowej względem innych źródeł energii. Na wysokość kosztów w przyszłości istotny wpływ mają regulacje prawne – np. wpływające na cenę pozwoleń emisji CO₂, zmieniające wymagania dotyczące bezpieczeństwa czy czystości spalin. Ogromny wpływ ma też zastosowana stopa dyskontowa (jest to parametr zmniejszający dzisiejszą wartość przyszłego strumienia przychodów). Prowadzone w krajach zachodnich porównania konkurencyjności różnych typów elektrowni, przy założonych różnych stopach dyskontowych, wskazują, że ma ona w większości przypadków decydujące znaczenie dla wyników porównań. Obliczenia porównawcze wykonane dla elektrowni jądrowej i węglowej wykazały, że przy stopie dyskonta równej 5% we wszystkich (z wyjątkiem Wielkiej Brytanii) rozważanych krajach koszty produkcji energii elektrycznej w elektrowni jądrowej były niższe. Natomiast przy stopie dyskonta 10% w około połowie krajów niższe stały się koszty w elektrowni węglowej (Bennet, 2014).

Nie ma zatem zgody co do tego, czy koszty wytwarzania energii w elektrowniach jądrowych będą w przyszłości niższe czy wyższe w porównaniu do innych źródeł (czyli elektrowni gazowych, węglowych, paneli fotowoltaicznych, farm wiatrowych i innych). Wyniki takich porównań są zależne od założeń przyjętych w obliczeniach, a zatem szacunki przeprowadzone przez różne osoby mogą się znacząco od siebie różnić. Nic więc dziwnego, że porównania kierowane przez różne osoby czy insty-

Ōi Nuclear Power Plant
Ayumu Kawazoe on Flickr.com

tucje prowadzą czasem do przeciwnych wniosków, zwłaszcza wówczas, gdy reprezentują one sprzeczne interesy. Jednak o ile opłacalność budowy nowych elektrowni może być dyskusyjna, to z tych już zbudowanych i sprawnych należy jak najdłużej korzystać.

Atrakcyjność energetyki jądrowej opiera się głównie na bardzo niskich, w porównaniu z węglem czy gazem, kosztach paliwa oraz długim okresie eksploatacji elektrowni, wynoszącym według założeń 60 lat. Dla porównania, zazwyczaj przyjmowany okres eksploatacji elektrowni węglowych to około 35 lat, gazowych – 25 lat, paneli fotowoltaicznych – 25 lat, a turbin wiatrowych – 20 lat. Koszty budowy elektrowni jądrowej są jednak wysokie, wyższe niż elektrowni węglowej i znacznie wyższe niż elektrowni gazowej, w dużym stopniu ze względu na rozbudowane systemy bezpieczeństwa zapobiegające wystąpieniu awarii oraz systemy ochrony personelu przed promieniowaniem.

Wszystkie porównania ekonomiczne między elektrowniami jądrową, węglową, gazową i źródłami odnawialnymi sprowadzają się ostatecznie do problemu, czy niskie koszty paliwa w elektrowni jądrowej rekompensują wyższe koszty inwestycyjne.

[Na podstawie materiału dydaktycznego: Zbigniew Szkop, A ile to będzie warte kiedyś?]

W tym kontekście zastanawiająca jest decyzja Niemiec o zamykaniu wszystkich działających w tym kraju elektrowni jądrowych.

Np. w maju 2020 roku wyburzono wieżę chłodniczą zamykanej elektrowni jądrowej w Philippsburgu, która zaspokajała 1/6 zapotrzebowania na elektryczność w Badenii-Wirtembergii.

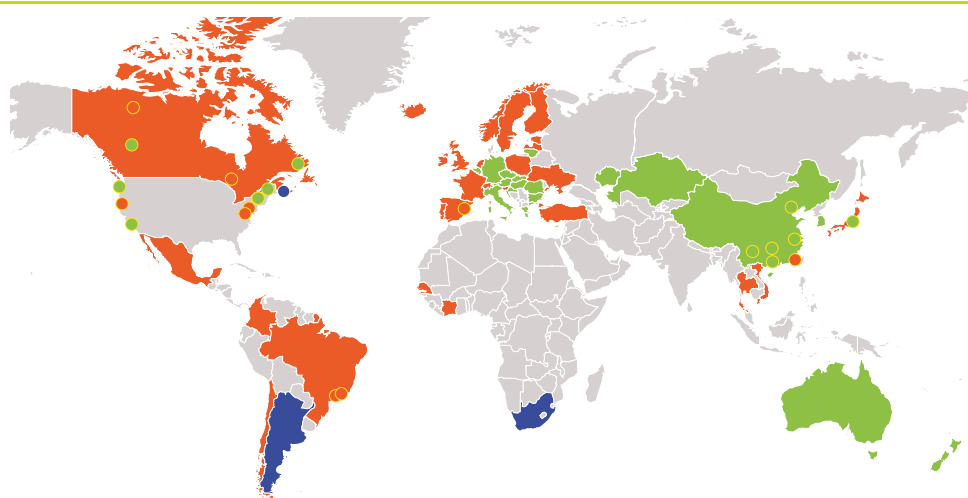
Mitygacja zmiany klimatu na świecie

Działania podejmowane w UE w celu ograniczenia poziomu emisji są ważne, jednak do skutecznego ograniczenia zmiany klimatu potrzebne jest, aby takie działania zostały wprowadzone we wszystkich krajach.

Jak wygląda wprowadzanie rozwiązań ekonomicznych ograniczających emisje CO₂ na świecie? Podobnie jak w UE, inne kraje korzystają z podobnych narzędzi: podatków węglowych oraz rynku pozwoleń na emisje. Poniższa mapa pokazuje, gdzie obecnie te rozwiązania są stosowane lub ich wprowadzenie jest planowane.

Rysunek 1. Wprowadzone lub planowane do wprowadzenia rozwiązania ekonomiczne ograniczające emisje CO₂ (podatek węglowy i rynek pozwoleń na emisje). Stan na rok 2019.

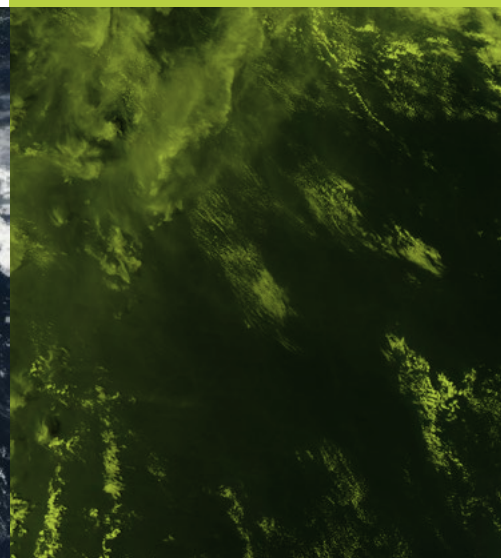
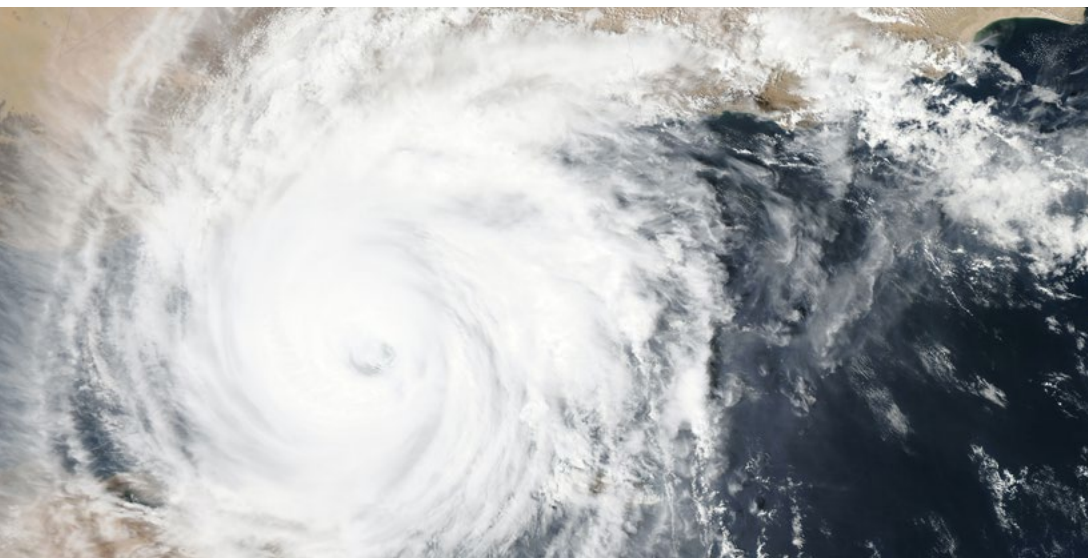
Źródło: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>



IBRD 44631 | sierpień 2019

Dobrze, że wiele krajów stosuje już narzędzia finansowe, które obciążają kosztami emisje CO₂. W przyszłości kluczowe będzie ich wprowadzenie w dużych gospodarkach takich jak USA, Indie czy Rosja oraz zwiększenie skuteczności tych rozwiązań.

Należy dążyć do tego, aby w niedalekiej przyszłości doprowadzić do międzynarodowego porozumienia, które będzie egzekwować dobrowolne deklaracje złożone w Porozumieniu paryskim z 2015 roku. Daje to szansę na przezwyciężenie „tragedii dóbr wspólnych” i skuteczne ograniczenie globalnych emisji. W końcu sam Garrett Hardin, twórca koncepcji „wspólnego pastwiska”, po sukcesie swojej pracy mówił, że słowo „tragedia” w tytule nie powinno być brane dosłownie, lecz raczej w metaforycznym sensie. Te przemyślenia doprowadziły go też do konkluzji, że swoją pracę powinien był nazwać „*Tragedią nieuregulowanych dóbr wspólnych*” („*Tragedy of Unregulated Commons*”), bo w przypadku regulowanych dóbr wspólnych tragedii można uniknąć.



ADAPTACJA DO ZMIANY KLIMATU

Jak wiesz z lekcji 9, na skutek zmiany klimatu częściej będą występować ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak przedłużające się okresy upałów, susze, gwałtowne ulew i powodzie czy wzrost poziomu morza. Z tego powodu, oprócz działań mitygacyjnych, konieczne jest podejmowanie działań adaptacyjnych, zwiększających odporność społeczeństwa i gospodarki na występowanie niespotykanych do tej pory efektów klimatycznych.

Działania adaptacyjne mają pozytywny wpływ lokalny i często również pozytywnie wpływają na globalny klimat. Takim działaniom poświęca się coraz więcej uwagi, ze względu na ich lokalną skuteczność i relatywnie łatwiejsze wprowadzenie w życie niż w przypadku działań mitygacyjnych. Należy tu jednak podkreślić, że chociaż adaptacja do zmian klimatycznych jest ważnym uzupełnieniem działań związanych z kryzysem klimatycznym, nie może zastępować ograniczania skali globalnego ocieplenia. Co więcej, realizacja części działań adaptacyjnych wymaga dużych ilości energii i surowców, co powoduje dodatkowe emisje gazów cieplarnianych – np. korzystanie z urządzeń klimatyzacyjnych zwiększa zużycie energii elektrycznej, która najczęściej jest pozyskiwana z paliw kopalnych.



W UE, we współpracy pomiędzy Komisją Europejską a Europejską Agencją Środowiska powstała inicjatywa ADAPT, której zadaniem jest wspieranie państw członkowskich w adaptacji do zmiany klimatu. »

Czym są działania adaptacyjne?

Lista działań adaptacyjnych, które powinny być realizowane w Polsce, jest trafnie wymieniona w opracowaniu przygotowanym przez Ministerstwo Środowiska już w 2013 roku. Wskazuje się tam na konieczność podjęcia między innymi takich działań jak:

- zapobieganie niedoborom wody, unikanie projektowania inwestycji na terenach zagrożonych powodzią, zrównoważone użytkowanie zlewni rzek kosztem ograniczenia gruntów ornych i budownictwa, przywracanie rzekom naturalnego biegu, budowę zbiorników retencyjnych czy stworzenie warunków krajobrazowych, które sprzyjają bezpiecznemu gromadzeniu wody w okresie jej nadmiaru i oszczędnym wykorzystywaniu jej w trakcie suszy,
- podjęcie działań zabezpieczających przed przerwami w dostępie do energii elektrycznej na skutek awarii spowodowanych huraganami i burzami oraz zwiększonego zapotrzebowania na wodę do chłodzenia elektrowni w okresie upałów,
- przygotowanie rolnictwa na susze, falki upałów, nawałnice, nowe choroby i szkodniki,
- uwzględnienie już na etapie projektowania infrastruktury możliwości częstszego występowania gwałtownych zjawisk pogodowych oraz długotrwałych fal upałów,
- adaptacja strefy wybrzeża do rosnącego poziomu morza, co wiąże się ze wzrostem częstotliwości powodzi sztormowych, degradacją brzegu morskiego i ryzykiem skażenia lub zasolenia wód gruntowych,
- przygotowanie opieki zdrowotnej na możliwe zwiększenie zachorowalności na raka skóry, upały jako zagrożenie dla osób z chorobami układu krążeniowego i oddechowego, choroby odkleszczowe.

Ministerstwo Środowiska opracowało również specjalne plany adaptacji do zmiany klimatu dla miast, ze względu na szczególnie duże wyzwania stojące przed terenami miejskimi. W raporcie zwraca się uwagę na fakt, że w miastach problemem są duże obszary szczelnej nawierzchni, które uniemożliwiają odpływ wód opadowych i roztopowych. Przyczyniają się one do przeciążenia systemów kanalizacyjnych i zwiększonego ryzyka podtopień i powodzi. Częstsze i dłuższe okresy upałów powodują, że w okresie letnim obszary zurbanizowane są szczególnie narażone na niedobory wody i występowanie wysp ciepła. W miastach utrudniona jest także retencja wody, czyli gromadzenie wody opadowej i uwalnianie jej do środowiska, a nie do kanalizacji. Ze względu na duże skupiska ludzi, istotnym problemem mogą być także przerwy w dostawie energii elektrycznej spowodowane gwałtownymi zjawiskami atmosferycznymi.

Przytaczamy tu informacje pochodzące z rządowych opracowań, ponieważ trafnie opisują one sytuację i prawidłowo wskazują, jakie działania należy podjąć w celu adaptacji do zmiany klimatu. A jak wygląda praktyka działań adaptacyjnych w Polsce?

Przykładem dobrej praktyki związanej z małą retencją, a jednocześnie ochroną bioróżnorodności, jest stworzenie mokradła „Przemkowskie Bagno” w Przemkowskim Parku Krajobrazowym w południowo-zachodniej Polsce. Działanie to



Pełna nazwa opracowania to:
Strategiczny plan adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do roku 2030.

Cały dokument można przeczytać tu: »



O zalecanych rozwiązaniach ograniczających zagrożenie suszami i powodziami w Polsce przeczytasz więcej w Komunikacie interdyscyplinarnego zespołu doradczego ds. kryzysu klimatycznego przy prezesie PAN na temat zmiany klimatu i gospodarki wodnej w Polsce. »



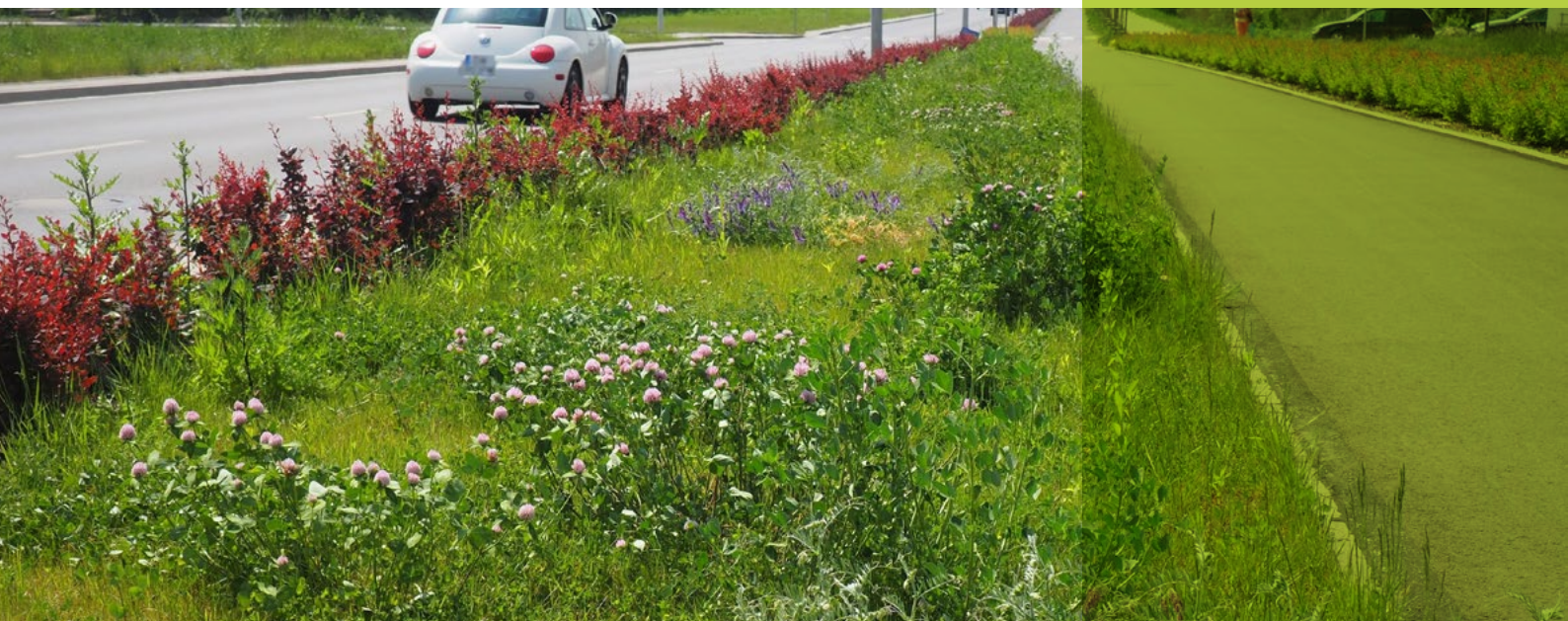
Strona projektu Klimada, w ramach którego opracowano plany adaptacji do zmiany klimatu dla 44 miast w Polsce »

pozwoili zmienić teren byłego poligonu w siedlisko wodno-błotne zwiększające możliwości retencyjne doliny rzeki Szprotawy, zaburzone wcześniej na skutek niewłaściwej melioracji i zagospodarowania okolicznych terenów.

Coraz więcej miast decyduje się na ograniczanie koszenia trawników lub nawet zakłada łąki miejskie. Polne kwiaty zamiast krótko przyciętej trawy mogą się podobać lub nie, ale faktem jest, że zieleń miejska pozostawiona w naturalnym stanie jest bardziej odporna na upały i brak deszczu. Pomału coraz więcej osób zaczyna rozumieć korzyści, jakie dają nam drzewa – zarówno w mieście, jak i poza nim. Pojawiają się miejsca, gdzie żywność jest produkowana w sposób ekologiczny, bezorkowo, według zasad permakultury.



Artykuł opisujący znacznie drzew w mieście »



Niestety, dużo jest też przykładów negatywnych. W dalszym ciągu najczęstszym sposobem „modernizacji” placów i rynków w miastach jest zastępowanie drzew i zieleni gładkimi, pustymi placami, szczelnie wyłożonymi kamieniami, asfaltem lub betonem. Podobnie niezrozumiałe jest, lecz niestety bardzo częste, usuwanie całych alei przydrożnych drzew czy realizowanie – bardzo kosztownych – projektów zmieniających naturalne rzeki w wybetonowane kanały. Przykładem takiej inwestycji jest uregulowanie rzeki Włódzicy (Rejon Kotliny Kłodzkiej), sfinansowane ze środków UE przeznaczonych na projekty proekologiczne. Inwestycję zrealizowano ze względu na skargi mieszkańców posiadających domy na terenach zalewowych rzeki i skarżących się na sezonowe podtopienia. W efekcie, bez przeprowadzenia analizy wpływu inwestycji na środowisko, wykonano „remont istniejącej zabudowy regulacyjnej wraz z modernizacją stopni celem poprawienia spływu wód oraz umożliwienia migracji ryb”, co zniszczyło ekosystem rzeki i przyspieszyło spływ wody, pogłębiając zagrożenie suszą. Ten przykład pokazuje, że niestety często duże kwoty przeznaczane są na nieprzemyślane i szkodliwe ekologicznie inwestycje, podczas gdy powinniśmy realizować projekty o zupełnie przeciwnym działaniu. Należy mądrze zatrzymywać wodę w środowisku, a ekosystemy trzeba – oczywiście – chronić, a nie niszczyć.

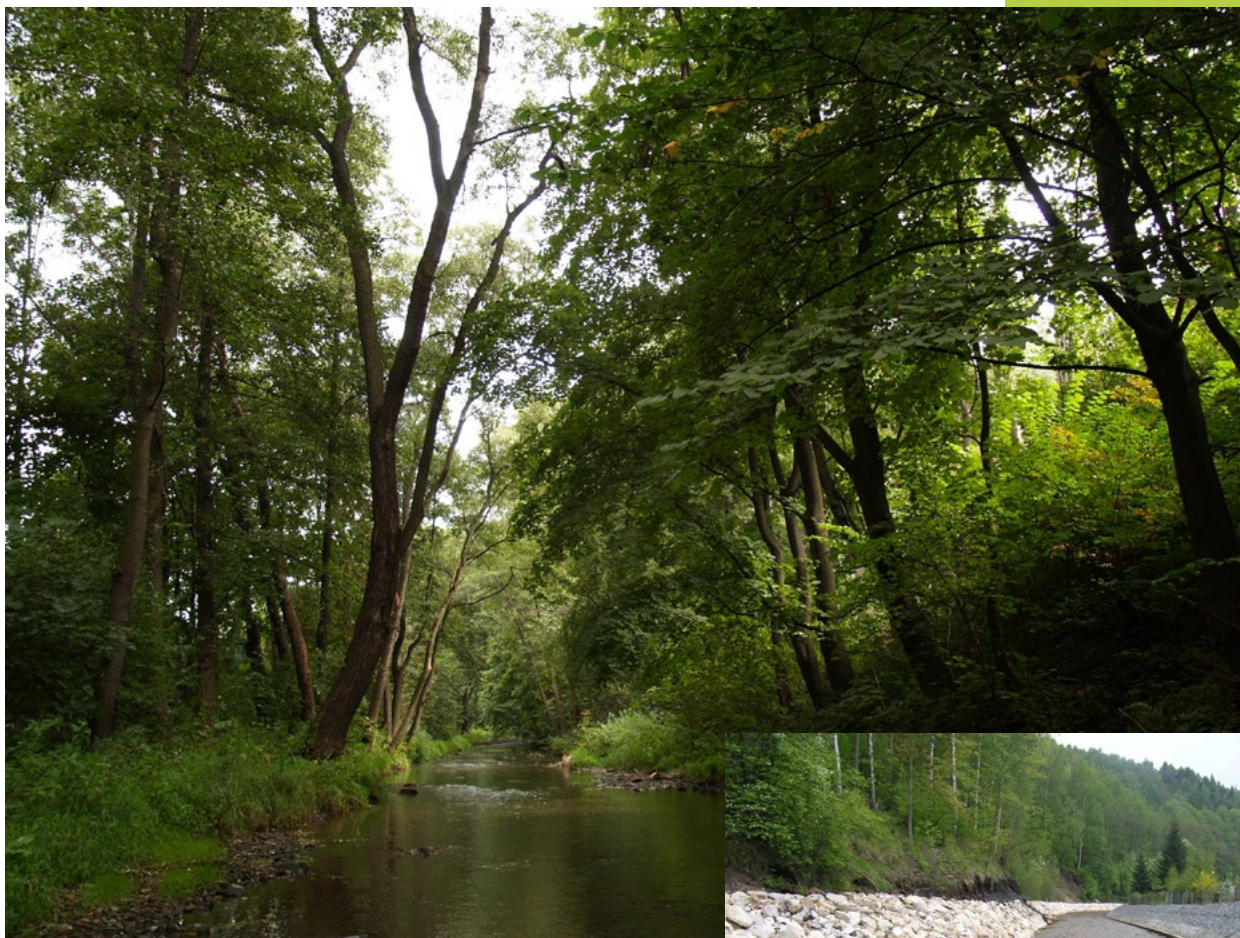
Niekoszone trawniki we Wrocławiu.
Fot: Małgorzata Piszczyk.



Artykuł o szkodliwości regulowania rzek »



Raport WWF o zagrożeniu dla rzek z powodu wykonywania prac utrzymaniowych »



Rzeka Włodzica, w mieście Nowa Ruda przed i po uregulowaniu wykonanym w latach 2008–2009.

Autor: Paweł Kisiel



PODSUMOWANIE

Istnieje szereg narzędzi ekonomicznych pozwalających wejść na ścieżkę redukcji emisji, które są dobrze opisane przez specjalistów i sprawdzone w praktyce. Na razie są implementowane w ograniczonym zakresie, więc ich wpływ na globalny poziom emisji jest niewielki. Należy dążyć do ich upowszechnienia i intensywniejszego stosowania, w skali adekwatnej do stojących przed nami wyzwań.

Również metody skutecznej adaptacji są znane i opisane w opracowaniach publikowanych przez instytucje rządowe. Część z tych działań jest wprowadzana w życie, ale wciąż, zaskakująco często, realizowane są kosztowne projekty, które pogarszają naszą sytuację i perspektywy na przyszłość. Żeby lepiej przygotować się na nadchodzące zmiany, powinniśmy po pierwsze nie powiększać szkód, a po drugie realizować na większą skalę sprawdzone działania mitygacyjne i adaptacyjne.



Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – gospodarowanie ekosystemami

Jak pamiętasz z lekcji 11, gospodarując ekosystemami (przede wszystkim lądowymi), możemy wywierać znaczący wpływ na klimat – wpływając zarówno na wymuszenia, jak i na sprzężenia klimatyczne. Nasze działania ograniczające zmianę klimatu (mitygacyjne) powinny polegać na ograniczaniu wymuszeń (w szczególności emisji gazów cieplarnianych z użytkowania i zmian użytkowania gruntów) i dodatknych sprzężeń zwrotnych (zwiększających emisje), a z drugiej strony – wzmacnianiu ujemnych sprzężeń (w szczególności tych polegających na sekwestracji węgla w ekosystemach).

Ale działania oparte na przyrodzie to także adaptacja, czyli zmniejszanie wrażliwości ekosystemów, włącznie z antroposferą, na zmianę klimatu – np. poprzez kształtowanie retencji wody i lokalnego obiegu wody czy zmianę sposobów upraw rolnych i leśnych. Co ważne, wiele działań adaptacyjnych działa też ograniczająco (mitygująco) na zmianę klimatu!

PO PIERWSZE: OCHRONA DZIKIEJ PRZYRODY

Ekosystemy naturalne stanowią wciąż największy lądowy rezerwuár węgla i decydują o istnieniu większości gatunków na Ziemi. A tempo ich zanikania wciąż przyspiesza. Dlatego skuteczna ochrona pozostałych jeszcze ekosystemów naturalnych jest podstawowym warunkiem koniecznym dla powstrzymania kryzysu klimatyczno-ekologicznego. Jednym z działań na rzecz powstrzymania degradacji ekosystemów jest tworzenie obszarów chronionych. W ostatnich latach ich areál w skali świata rósł, dochodząc dziś do niecałych 15% powierzchni lądowej i morskiej świata. Ale pamiętajmy, że statystyka ta obejmuje obszary o różnych kategoriach ochrony, a ponadto status ochrony prawnej nie gwarantuje, że będzie ona wykonywana skutecznie. Wystarczy wspomnieć przykłady z Polski: np. niedawną historię konfliktu w Obszarze Dziedzictwa Ludzkości UNESCO „Puszcza Białowieska” czy plany budowy kopalni węgla kamiennego na terenie Poleskiego Parku Narodowego, stanowiącego też Rezerwat Biosfery. Tymczasem naukowcy wzywają do zwiększenia powierzchni Ziemi pozostającej pod skuteczną ochroną do 50% (Wilson, 2016).

Ekosystemy naturalne rozumiane są tu jako ekosystemy najwyżej nieznacznie zmienione przez człowieka (np. lasy, sawanny, tundra, bagna) – w odróżnieniu od ekosystemów antropogenicznych (np. miasta, pola uprawne) czy tzw. ekosystemów półnaturalnych, np. łąk kośnych i pastwisk. W sensie ścisłym trudno już dziś mówić o istnieniu ekosystemów całkowicie naturalnych, bowiem prawie wszędzie sięga wpływ człowieka.



O planach budowy kopalni w sąsiedztwie Poleskiego Parku Narodowego czytaj tutaj »



Przeczytaj o wysiłkach zwiększenia areálu obszarów chronionych na stronie projektu **half-earth** »

PO DRUGIE: RESTYTUCJA EKOSYSTEMÓW ZDEGRADOWANYCH

Restytucja ekosystemów to wspomaganie regeneracji ekosystemu, który został zaburzony lub uległ degradacji wskutek działań człowieka (Society for Ecological Restoration International, 2004). To jeden z coraz szybciej rozwijających się kierunków czynnej ochrony przyrody. Cele restytucji przyrodniczej mogą być różne: od przywracania siedlisk zagrożonych gatunków po odtwarzanie utraconych usług ekosystemowych. Zwykle, choć nie zawsze, mamy jednak do czynienia z synergia najróżniejszych efektów przyrodniczych.

Niekiedy stosowany jest też termin **renaturyzacja ekosystemów**, który jest węższy znaczeniowo i ma nieco inny kontekst. Podczas gdy renaturyzacja oznacza literalnie przywrócenie stanu naturalnego, restytucja przyrodnicza ma na celu przywrócenie jakichś funkcji ekologicznych zdegradowanego ekosystemu, nie precyzując, czy stan docelowy ma być ekosystemem naturalnym. Koncepcja restytucji przyrodniczej obejmuje więc zarówno odtwarzanie lasów naturalnych na obszarach wylesionych, jak i np. przywracanie akumulowania węgla glebowego w półnaturalnych ekosystemach rolniczych. Metody restytucji ekosystemów uwzględniają zarówno działania techniczne o niekiedy znacznych nakładach pracy, jak i powstrzymanie się od działań i oddanie pierwszeństwa spontanicznym procesom przyrodniczym (zobacz przykład w akapicie o lasach), ale w obu przypadkach końcowym celem jest przywrócenie do działania naturalnych procesów przyrodniczych.

Lasy. Odtwarzanie ekosystemów leśnych, powszechnie utożsamiane po prostu z zalesianiem, to jedno z najważniejszych działań proklimatycznych. Lasy to jedne z najefektywniejszych (w naszej perspektywie czasowej) pochłaniaczy węgla. Jak pisaliśmy w lekcji 11, oszacowano, że w skali świata możliwe jest zalesienie miliarda hektarów gruntów – nawet jeśli ten areał i wiązany z nim potencjał akumulacji ponad 200 GT węgla w lasach uznamy za nieco przeszacowany (patrz wyjaśnienia w lekcji 11), to niewątpliwie lasy do czasu osiągnięcia dojrzałości, czyli przez 100–200 lat są bardzo skutecznymi pochłaniaczami węgla.

Potencjał akumulacji węgla mają zarówno lasy naturalne, jak i gospodarcze, ale nie można ich zrównywać, ponieważ węgiel zgromadzony w drzewach przeznaczonych do wycięcia wróci do atmosfery znacznie szybciej niż w lesie naturalnym – po rozłożeniu się lub spaleniu drewna. Tylko w wyjątkowych sytuacjach wykorzystane w budownictwie drewno zachowa zasymilowany węgiel dłużej niż kilkadziesiąt lat. Z drugiej strony, las gospodarczy stanowi magazyn węgla (zawartego nie tylko nad ziemią, ale też pod jej powierzchnią), jednak jest on znacznie mniejszy niż w lesie naturalnym, ponieważ martwe drewno nie zasila puli materii organicznej w glebach, które za to ulegają erozji w wyniku gospodarki leśnej.

Regeneracja lasów może być zapoczątkowana sadzeniem drzew, ale może też wynikać z naturalnej sukcesji. W wielu regionach świata, dla których las jest roślinnością potencjalną (np. w Europie Środkowej), zwykle ekosystemy leśne regenerują się po ustąpieniu działań człowieka, choć dzieje się to w różnym tempie. Sadzenie drzew, a czasem powstrzymywanie bujnej roślinności nieleśnej, może przyspieszyć proces odnawiania się lasu.



O usługach ekosystemowych przeczytasz więcej w lekcji 10.

Ochrona czynna jest oparta na aktywnych działaniach człowieka, przyspieszających lub powstrzymujących procesy naturalne dla osiągnięcia konkretnych efektów przyrodniczych. Jej przeciwieństwem jest ochrona bierna, polegająca na powstrzymaniu się od jakiegokolwiek ingerencji w naturalne procesy.

Synergia to interakcja dwóch lub więcej czynników (działań) polegająca na wzajemnym wzmacnianiu ich efektu. Na przykład zwiększenie udziału lasów naturalnych w krajobrazie skutkuje zwykle większym pochłanianiem dwutlenku węgla, wzmacnia retencję wody i podnosi bogactwo gatunkowe.

CZY WIESZ, ŻE ?

 Czy wiesz że: Organizacja Narodów Zjednoczonych ogłosiła lata 2021–2030 **dekadą restytucji ekosystemów**, podkreślając proklimatyczne znaczenie tego działania? ONZ wystosowała globalne „wezwanie do działania” w celu zmobilizowania wsparcia politycznego i finansowego niezbędnego do odtworzenia wylesionych i zdegradowanych ekosystemów na świecie w nadchodzącym dziesięcioleciu, aby wesprzeć dobrobyt 3,2 mld ludzi na całym świecie. W dokumencie mowa o potrzebach odtworzenia przyrody na obszarze ponad 2 miliardów hektarów – to dwa razy więcej niż powierzchnia Europy.

O dekadzie restytucji ekosystemów czytaj tutaj »

Potencjalna roślinność naturalna to formacja roślinna, która zregenerowałaby się na danym obszarze, gdyby ustąpiła jakakolwiek działalność człowieka.

PRZYKŁAD

Przykładem odtworzenia lasu drogą naturalnej sukcesji jest regeneracja tzw. „Lasu Ochronnego Szast” w Puszczy Piskiej po wiatrołomie z lipca 2002 roku. Huragan zniszczył wtedy 30.000 ha sosnowych lasów gospodarczych. Większość tego obszaru uprzątnięto i obsadzono na nowo, ale na powierzchni 460 ha pozostawiono połamane drzewa w celu obserwowania naturalnej sukcesji. Badania wykonane po 12–13 latach wykazały, że zregenerował się tam las wielogatunkowy o zróżnicowanej strukturze wiekowej, który w przyszłości będzie bardziej odporny na zaburzenia, a jednocześnie ma znacznie wyższą bioróżnorodność niż lasy posadzone ręką człowieka (Szwagrzyk i in.. 2018). Samoistna restytucja była więc zarówno skuteczniejsza, jak i tańsza niż sztuczne zalesienia, choć powstały las może nie być dogodny dla standardowej gospodarki leśnej.



Czytaj więcej w serwisie Nauka w Polsce »



Las Ochronny Szast
w 2016 roku – 14 lat
po przejściu huraganu.
Fot. Jerzy Szwagrzyk.

WAŻNE!

Regeneracja lasów, obok ogromnego potencjału ściągania dwutlenku węgla, stanowiącego ważny sposób **mitigacji** globalnego ocieplenia, ma jednocześnie wielkie znaczenie dla powstrzymania wymierania gatunków, a także dla odtworzenia lokalnego krążenia wody, a zatem jest jednym z najważniejszych działań **adaptacyjnych**.

Mokradła. W lekcji 11 pisaliśmy o odtwarzaniu osuszonych torfowisk w celu powstrzymania ucieczki do atmosfery zakumulowanego w nich węgla organicznego. Rocznie z odwodnionych torfowisk w skali świata emitowanych jest ok. 2 Gt dwutlenku węgla, czyli odpowiednik 5% antropogenicznych emisji. Ta liczba pokazuje możliwy potencjał mitygacji: poprzez działania ponownego nawodnienia zaledwie 0,3% powierzchni lądów (tyle zajmują osuszone torfowiska) jesteśmy w stanie powstrzymać emisje niemal 2 Gt CO₂. Na czym polega ponowne nawadnianie torfowisk? Zostały one zwykle odwodnione za pomocą sieci rowów i kanałów odprowadzających wodę do rzek i mórz. W wielu przypadkach wystarczy te sztuczne ciekie zatamować, by przywrócić gromadzenie się wody w tych miejscach. Niestety, zmiany fizyczne, chemiczne i biologiczne w torfie powodują, że odtwarzane bagna nie będą takie same jak te, które istniały przed osuszeniem, niemniej efekt klimatyczny jest widoczny zaraz po podwyższeniu poziomu wody. Pamiętajmy: w skali globalnej główny efekt klimatyczny restytucji torfowisk nie wynika z bieżącej akumulacji węgla w procesach torfotwórczych – ta jest stosunkowo wolna, ale z powstrzymania spowodowanych odwodnieniem ogromnych emisji węgla zakumulowanego w ciągu poprzednich tysięcy lat. To samo dotyczy w pewnym stopniu również mokradeł nietorfowych, które są wprawdzie nieco mniej pojemnymi magazynami węgla, ale również tracą go szybko wskutek odwodnienia.

O ile ograniczenie emisji CO₂ jest głównym globalnym argumentem na rzecz odtwarzania obszarów bagiennych, o tyle retencja wody i wzmacnianie jej obiegu między lądem i atmosferą jest motywem najważniejszym w kontekście lokalnym i regionalnym. W regionach narażonych na susze i ekstremalne upały restytucja mokradeł jest bardzo ważną adaptacją do zmiany klimatu.

Przykładem odtwarzania bagien jako mitygacji zmian klimatu jest, cytowany już w lekcji 11, projekt Life „Peat Restore” zmierzający do ponownego nawodnienia 5,3 tys. hektarów osuszonych torfowisk w Niemczech, Polsce, Litwie, Łotwie i Estonii: <https://life-peat-restore.eu/pl/> »

PRZYKŁAD



Zastawka blokująca rów odwadniający na torfowisku.
Fot. Paweł Pawlaczyk

PRZYKŁAD

Innym przykładem jest niemiecki system Moorfutures, wdrożony przez trzy kraje związkowe (Meklemburgia – Pomorze Przednie, Brandenburgia i Szlezwik-Holsztyn), polegający na sprzedaży „cegiełek”, z których zysk jest przeznaczany na redukcję emisji gazów cieplarnianych poprzez powtórne nawodnienie osuszonych torfowisk. Firmy lub osoby, które chcą obniżyć swój „ślad węglowy”, mogą wykupić takie certyfikaty redukcji emisji. Ilość ton CO₂, które nie zostały wyemitowane dzięki przekształceniu dotychczas użytkowanych rolniczo odwodnionych torfowisk w bagna jest wyliczana na podstawie badań naukowych. **Więcej na ten**

Paludikultura, czyli rolnictwo bagienne – ponieważ większość odwodnionych torfowisk jest użytkowanych rolniczo, ich restytucja przyrodnicza w kierunku bagien naturalnych oznaczałaby konieczność wykupu ogromnych terenów od aktualnych właścicieli. Wcale nie jest to konieczne dla powstrzymania emisji. Alternatywą jest paludikultura, czyli bagienne rolnictwo, pozwalające na utrzymanie funkcji produkcyjnej torfowisk po przywróceniu na nich warunków bagiennych. Trzcina czy różne gatunki pałki wodnej, a także drzewa takie jak olsza, to rośliny, które można uprawiać na ponownie nawodnionych torfowiskach i pozyskiwać w skali przemysłowej, z przeznaczeniem na produkcję energii (spalanie, biogaz) czy materiałów budowlanych albo ociepleniowych. Innym przykładem paludikultury jest uprawa mchów torfowców na wyeksploatowanych torfowiskach w celu zastąpienia w ogrodnictwie torfu pozyskiwanego kosztem niszczenia wciąż kolejnych naturalnych bagien torfowych.

Więcej o paludikulturze na stronie Centrum Bagien w Greifswaldzie »



Pałka szerokolistna i wykonana z niej płyta konstrukcyjno-ociepleniowa. Zwróć uwagę na widoczne na przekroju pędów roślin gąbczaste tkanki, które decydują o znakomitych właściwościach izolacyjnych wykonanych z nich materiałów.
Fot. W. Kotowski.



Photo by Mick De Paola on Unsplash

Rzeki. Należą do najważniejszych regulatorów przepływu wody między lądem, a oceanem, a przy tym odpowiadają za przemieszczanie się wszystkich substancji niesionych wraz z wodą. Pamiętajmy, że rzeka to nie tylko koryto rzeczne z płynącą wodą. Ekosystem rzeki jest ściśle połączony funkcjonalnie z obszarem zlewni powyżej, z którego dopływa woda, a także z przylegającymi terenami, w szczególności doliną rzeczna i zlokalizowanymi w niej terenami zalewowymi i mokradłami nadrzecznymi. Zmiany w obrębie zlewni oraz w bezpośrednim sąsiedztwie rzeki wpływają znacząco na jej funkcjonowanie. Na przykład wylesienie zlewni i regulacje małych cieków spowodowały w Polsce przyspieszenie spływu wody do dużych rzek, zwiększając ryzyko powodzi po nagłych opadach, a jednocześnie potęgując zjawiska susz w okresach bezdeszczowych. Problem został pogłębiony przez regulacje rzek, które zmniejszyły pojemność koryta, odcinając wałami tereny zalewowe i skróciły bieg rzeki, eliminując meandry i mokradła nadrzeczne. Obok zmniejszonej retencji wody zmiany te poskutkowały znacznym upośledzeniem zdolności rzek do samooczyszczania wód. W sytuacji, gdy w rolnictwie używa się coraz większych ilości nawozów, które m.in. powodują eutrofizację ekosystemów wodnych (jak pamiętasz z lekcji 11 jest to jedna z dwóch najbardziej przekroczonych „granic planetarnych”), odtwarzanie rzek wraz z bagiennymi strefami buforowymi (ramka) jest jednym z najważniejszych działań zaradczych. Restytucja rzek to przywracanie naturalnych procesów hydromorfologicznych, usuwanie przeszkód w migracji ryb i transporcie osadów, odsuwanie wałów przeciwpowodziowych, by umożliwić rozładowywanie wód wezbraniowych na terenach zalewowych (ramka) i wiele innych działań.



O praktycznych aspektach restytucji rzek i innych ekosystemów wodnych przeczytasz w podręczniku wydanym w 2020 r. przez Wody Polskie »

Bagienne strefy buforowe

– recepta na przeżytnienie wód, suszę i utratę bioróżnorodności

Bagienne strefy buforowe to mokradła zlokalizowane pomiędzy obszarami rolniczymi a ciekami lub zbiornikami wodnymi, które chronią wody przed zanieczyszczeniami pochodzenia rolniczego – w szczególności azotanami i fosforanami pochodzącymi z nawozów. Rośliny bagienne oraz żyjące w strefie korzeniowej mikroorganizmy oczyszczają z nich wodę zanim trafi ona do rzek, a nimi dalej do morza. Jak pamiętasz, zaburzenie cyklu azotu i fosforu jest jednym z najbardziej dotkliwych problemów środowiskowych naszych czasów (patrz lekcja 11 – granice planetarne). Ocieplenie klimatu potęguje zjawisko eutrofizacji wód, bowiem w wyższych temperaturach łatwiej dochodzi do zakwitów sinic i szybciej następują deficyty tlenu. Pamiętajmy, że odtwarzanie nadrzecznych mokradeł jednocześnie zwiększa retencję wody, spowalniając jej spływ do morza, i przywraca siedliska najbardziej zagrożonej grupie zwierząt i roślin. Dlatego powszechne przywracanie rzekom bagiennych buforów należy uznać za kluczowe działanie adaptacyjne. W niedawnej publikacji (Jabłońska i in., 2020) pokazano, że byłoby to działanie efektywne kosztowo: przywrócenie bagiennych stref buforowych na fragmencie zlewni Narwi o powierzchni równej 5% powierzchni Polski kosztowałoby – w zależności od scenariusza – od kilkudziesięciu do ponad 300 milionów złotych, pozwalając na oczyszczenie 33–82% azotu i 41–87% fosforu. Są to kwoty porównywalne do kosztów budowy kilkudziesięciu kilometrów drogi ekspresowej, a zatem mieszczące się w budżecie wydatków publicznych. Decyzja o sfinansowaniu powszechnego programu „naprawy” rzek jest więc kwestią wyboru priorytetów.

Bagna nadrzeczne.
Fot. W Kotowski



Odtwarzanie terenów zalewowych adaptacją do wzrastającego zagrożenia powodzią

Znakomitym przykładem adaptacyjnych działań renaturyzacyjnych jest odtworzenie terenów zalewowych nad Odrą w okolicy miejscowości Domaszków. Dzięki odsunięciu wału przeciwpowodziowego przywrócono rzece ok. 600 ha terenów zalewowych, zmniejszając zagrożenie powodziowe, a jednocześnie umożliwiając naturalną regenerację lasów łęgowych, stanowiących jedno z najcenniejszych siedlisk ptaków.

PRZYKŁAD

https://ratujmyrzeki.bagna.pl/images/Domaszkow_WWF.pdf »

PO TRZECIE: ROLNICTWO REGENERACYJNE

Jak już wiesz, obecny model rolnictwa przyczynia się do znaczących emisji gazów cieplarnianych, jednocześnie potęgując pustoszczenie i erozję gleb. W efekcie degradacji obszarów rolniczych w dużym tempie pod rolnictwo wycinane są kolejne obszary naturalnych lasów i osuszane bagna. Ten model rolnictwa jest z założenia niezrównoważony w długiej perspektywie czasowej, opiera się bowiem na eksploatacji gleb wytworzonych w ekosystemach naturalnych przed ich przekształceniem w grunty orne. Główne działania przyspieszające erozję i utratę materii organicznej, wraz z węglem, z gleb rolniczych to orka i intensywny wypas – zwłaszcza w rejonach górskich i w suchym klimacie. Aby zmienić tę sytuację konieczne jest powszechne przyjęcie zasad rolnictwa regeneracyjnego, czyli takiego, które zwiększa zasoby materii organicznej w glebie. Orka może zostać zastąpiona powierzchniowym spulchnianiem gleby i precyzyjnym siewem (tzw. uprawa bezorkowa). W ogrodnictwie i sadownictwie receptą jest permakultura, czyli trwała uprawa bez naruszania struktury gleby. Inną ważną koncepcją to agroleśnictwo, czyli łączenie na jednym obszarze upraw rolnych z regeneracją lasów, co znacząco zwiększa możliwości akumulacji węgla, a jednocześnie ogranicza wysychanie i poprawia warunki mikroklimatyczne.



Uprawa bezorkowa
Więcej informacji »



Permakultura
Więcej informacji »



Agroleśnictwo
Więcej informacji »

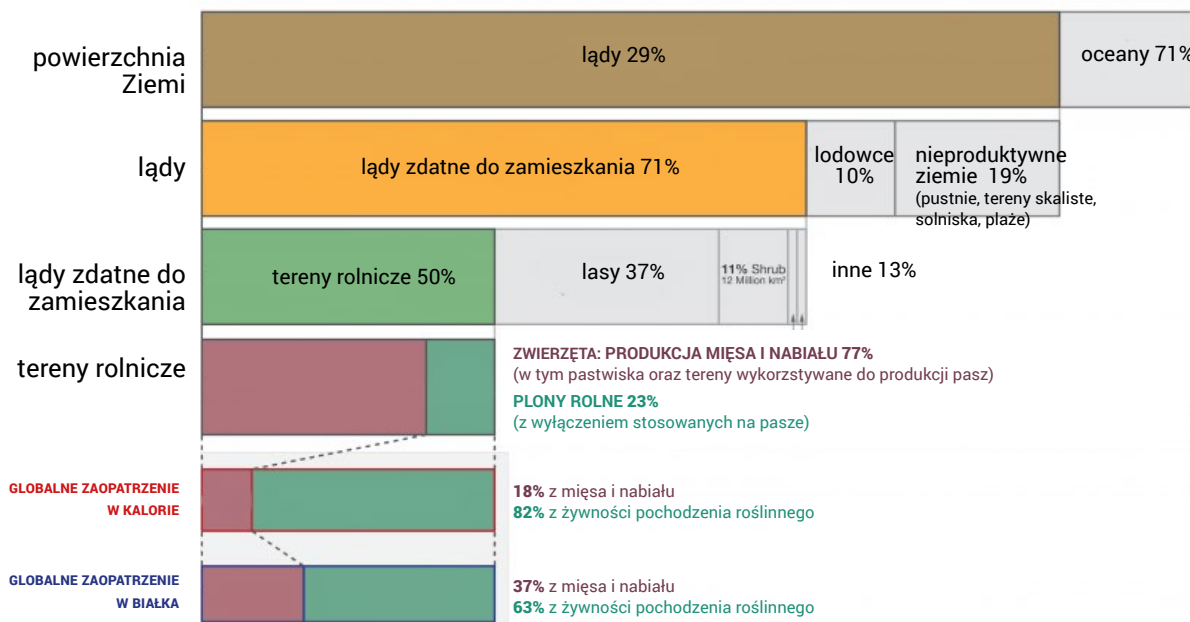
PO CZWARTE: ZMIANA DIETY

Do opisanych powyżej koniecznych zmian proklimatycznych w rolnictwie trzeba dodać znaczące zmniejszenie hodowli zwierząt, a w szczególności bydła i owiec, która generuje duże emisje metanu i dwutlenku węgla (patrz lekcja 11). Wiąże się to z koniecznością zmiany w diecie, czyli wyeliminowaniem lub znacznym zmniejszeniem spożycia mięsa i nabiału. Aż 77% gruntów rolniczych przeznaczonych jest na produkcję zwierzęcą – są to pastwiska, łąki kośne albo uprawy roślin pastewnych (Rysunek 1.). Dieta zdominowana przez mięso to „przywilej” stosunkowo niewielkiej części globalnej populacji. Gdybyśmy z niego zrezygnowali, powierzchnia zajęta pod obszary rolnicze mogłaby się znacząco zmniejszyć, oddając tereny pod regenerację naturalnych ekosystemów akumulujących węgiel i przywracających szerzej ujętą równowagę przyrodniczą. A przy okazji znaczne ograniczenie mięsa zdecydowanie poprawiłoby nasze zdrowie i jakość życia.

Jak oszacowano w Specjalnym raporcie IPCC o systemach lądowych i zmianie klimatu (IPCC, 2019), rozpowszechnienie zdrowej i zrównoważonej diety (opartej na produktach roślinnych i tych produktach odzwierzęcych, których wytworzenie stanowi mniejsze obciążenie dla środowiska) pozwoliłoby na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych o 0,7–8 Gt ekwiwalentu dwutlenku węgla.

**WSKAZÓWKI
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Global land use for food production

Our World
in Data

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser in 2019.

Rysunek 1: Globalna powierzchnia zajęta pod produkcję żywności.

CIEKAWY:

Jeśli porównać „ślad węglowy” różnych rodzajów diety, to jest on oczywiście najniższy w diecie wegańskiej, ale już w diecie wegetariańskiej włączającej duże ilości nabiału znacząco rośnie i przewyższa ślad węglowy diety uwzględniającej wieprzowinę i drób, ale eliminującą wołowinę i nabiał (Searchinger i in., 2018).

Pomysły na przyszłościowe źródła białek zwierzęcych o niskim śladzie węglowym to m.in. masowe hodowle bezkręgowców, zwłaszcza owadów, a także hodowla „sztucznego” mięsa in vitro.

Koncepcją łączącą restytucję ekosystemów z produkcją nowych rodzajów żywności jest uprawa jadalnych glonów w przybrzeżnych przeżyźnionych wodach morskich. Dopływający do mórz rzekami ładunek azotanów i fosforanów może być skutecznie pochłaniany przez uprawiane w wodzie glony, z których można wytwarzać żywność (mają dużą zawartość białka) albo stosować jako paszę dla zwierząt. Co ciekawe, krowy karmione paszą z dodatkiem wodorostów produkują w czasie trawienia znacznie mniej metanu niż przy tradycyjnej diecie (Roque i in., 2019).



Mięso z laboratorium »



Photo by Dana DeVoll on Unsplash

PO PIĄTE: PRZYRODA W MIASTACH – ADAPTACJA DLA PONAD POŁOWY LUDZKOŚCI

W miastach żyje już ponad 55% ludzi na świecie, a w 2050 roku będzie to według przewidywań aż 68%. Urbanizacja ogromnie zmienia funkcjonowanie przyrodnicze obszarów. Miasto, jako wyspa ciepła, potęguje efekt wzrostu temperatury związany ze zmianą klimatu. Całkowitemu zaburzeniu ulegają stosunki hydrologiczne i obieg wody. Dlatego do najważniejszych działań adaptacyjnych w miastach należy zwiększanie udziału powierzchni zielonych retencjonujących wodę. Tu szczególne znaczenie ma efekt chłodzenia w upalne dni wywołany parowaniem wody.

Mieszkanie w miastach jest wprawdzie korzystne energetycznie, ponieważ ogrzanie wielomieszkaniowych budynków wymaga mniej energii w przeliczeniu na osobę, a brak konieczności długich dojazdów redukuje zużycie paliw w transporcie. Z drugiej jednak strony w dzisiejszych czasach miasta są uzależnione od dostawy energii i surowców (w tym żywności) z zewnątrz, a wraz z wzrostem wielkości stają się coraz bardziej nieodporne na zaburzenie funkcjonowania systemu dostaw. **Dlatego kolejnym ważnym kierunkiem adaptacji do zmian klimatu w miastach jest częściowe przynajmniej uniezależnienie się od tych dostaw. Jednym z takich kierunków jest miejskie ogrodnictwo i rolnictwo.**

Dla stabilności ekosystemu miasta i poprawy jakości życia ludzi bardzo ważne jest też zwiększanie obszarów dzikiej przyrody – lasów miejskich, zarośli, mokradeł, łąk kwietnych, a także zachowywanie i sadzenie jak największej liczby drzew. Zapewniają one regulację mikroklimatu, ochronę przed smogiem, a przy okazji stanowią biotop owadów zapylających rośliny w naszych ogrodach i parkach, m.in. regulujących liczebność owadów.



O dobrych praktykach związanych z adaptacją miast do zmiany klimatu przeczytasz na stronie projektu **ADAPTCITY** »



A tutaj możesz przeczytać o strategii adaptacji Warszawy do zmian klimatu »



**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**



Photo by Anna Earl on Unsplash

Co mogę zrobić dla klimatu?

Skuteczne naprawianie problemów systemowych z perspektywy jednostki

W debacie o możliwościach działania jednostek wobec kryzysu klimatycznego ważną rolę odgrywa rozróżnienie na **działania indywidualne i zbiorowe**. W pewnym uproszczeniu te pierwsze dotyczą działań w sferze prywatnej, najczęściej zachowań konsumenckich i można je podejmować samodzielnie. Te drugie mają najczęściej charakter działań w sferze publicznej i wymagają współdziałania z innymi ludźmi. Zbiorowe działania często mają charakter raczej postaw obywatelskich niż postaw konsumenckich i wynikają z aktywnego zaangażowania w szersze życie społeczne. Ich celem jest osiągnięcie trwałej zmiany na poziomie systemowym.

W następnych akapitach przyjrzymy się bliżej tym dwóm rodzajom działania i złożonym relacjom między nimi.

DZIAŁANIA INDYWIDUALNE

Zachowania w sferze prywatnej najczęściej dotyczą decyzji konsumenckich, czyli zakupów różnych rzeczy i usług, oraz decyzji wpływających na zużycie energii w gospodarstwie domowym (np. sposoby ogrzewania czy chłodzenia domu, podgrzewania wody czy zasilania kuchni). Do tego obszaru zaliczamy tzw. „zielony konsumpcjonizm”, czyli wybór artykułów ze względu na to, w jaki sposób są produkowane (np. żywność z upraw ekologicznych), oraz minimalizowanie ilości odpadów.

Działania indywidualne wywierają bezpośredni wpływ na klimat, ale jest on niewielki. Aby ten wpływ był zauważalny, duża część społeczeństw musiałaby wprowadzić znaczące zmiany w swoim stylu życia (Stern, 2000). Jest to mało prawdopodobne, ponieważ działania indywidualne na masową skalę napotykają na bariery, o których wiesz już z lekcji 7. W praktyce konsumenci mogą kupić tylko to, co jest dostępne w sklepach, a styl życia jest silniej determinowany miejscem zamieszkania, majątkiem i sytuacją życiową niż indywidualnymi wyborami.



Photo by Sylvie Tittel on Unsplash



Międzynarodowa Agencja Energetyczna (MAE) przewiduje, że w roku 2020 globalna emisja CO₂ spadnie o 8%. Powodem jest zamrożenie gospodarki światowej z powodu pandemii koronawirusa. Tak dużego spadku emisji CO₂ z roku na rok nie zanotowano nigdy w historii – zmniejszenie emisji CO₂ związane z kryzysem ekonomicznym z roku 2009 było ok. 6 razy mniejsze. Jednocześnie, jak wiesz z prognoz IPCC, aby ograniczyć ocieplenie do 1,5°C względem epoki przedprzemysłowej, podobne tempo redukcji emisji musiałoby się stale utrzymywać w kolejnych dekadach aż do całkowitego odejścia od spalania paliw kopalnych w okolicach roku 2050.



Tak radykalna zmiana wymaga większych zmian niż kryzys i przejściowe ograniczenia. Zatrzymanie zmiany klimatu wymaga wdrożenia trwałych, przemyślanych zmian, które w ciągu kilku dekad doprowadzą do transformacji energetyki, rolnictwa, metod produkcji towarów i innych aspektów funkcjonowania gospodarki.

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych wpływających z własnej aktywności, czyli redukcja **indywidualnego śladu węglowego**, wymaga dużej wiedzy. Wiele firm stosuje nieuczciwy „zielony marketing”, promując jako dobre dla klimatu i środowiska rozwiązania, które w rzeczywistości są dyskusyjne. Szeroko stosowane są strategie marketingowe typu „*greenwashing*”. Gdyby wierzyć reklamom, najbardziej zielonymi firmami okazałyby się linie lotnicze i koncerny paliwowe, czyli dokładnie te branże, których wpływ na klimat jest największy. Słowo „*greenwashing*” można być może spolszczyć jako „ekościemę”, co nie jest najbardziej fortunnym tłumaczeniem angielskiego idiomu. Stosowanie tych strategii marketingowych sprawia, że konsumentom trudno jest wybrać takie działania, które rzeczywiście byłyby korzystne dla środowiska. Np. nie tylko nie jest jasne, czy papierowe słomki i kubeczki do napojów (które bywają i tak powlekane plastikiem) mają niższy koszt środowiskowy od plastikowych, ale namawianie do ich stosowania skutecznie odwraca uwagę od ważniejszych tematów. Dlatego podmioty niekoniecznie dbające o środowisko chętnie będą takie działania prowadzić.

W temacie kryzysu klimatycznego strategia odwracania uwagi dotyczy w szczególności celowego pomijania tematu odejścia od spalania paliw kopalnych, które jest kluczowym działaniem i bez którego nie mamy szans tego kryzysu zahamować. Niektóre popularne dyskursy „ekologiczne”, dotyczące np. zbierania śmieci, sadzenia lasów, mogą stanowić zastłonę dymną wobec braku prawdziwych systemowych rozwiązań. Pozostaje dyskusyjne, czy strategie te stosuje się z naiwności i dobrej woli, czy też robi się to celowo. Z całą pewnością do tej sytuacji, kiedy koloruje się na zielono różne drobne aspekty życia codziennego, a nie odchodzi systemowo od spalania węgla czy rażąco destrukcyjnych dla dóbr wspólnych rozwiązań ekonomicznych, pasuje biblijna metafora o odcezdaniu komara, a połykaniu wielbłąda.

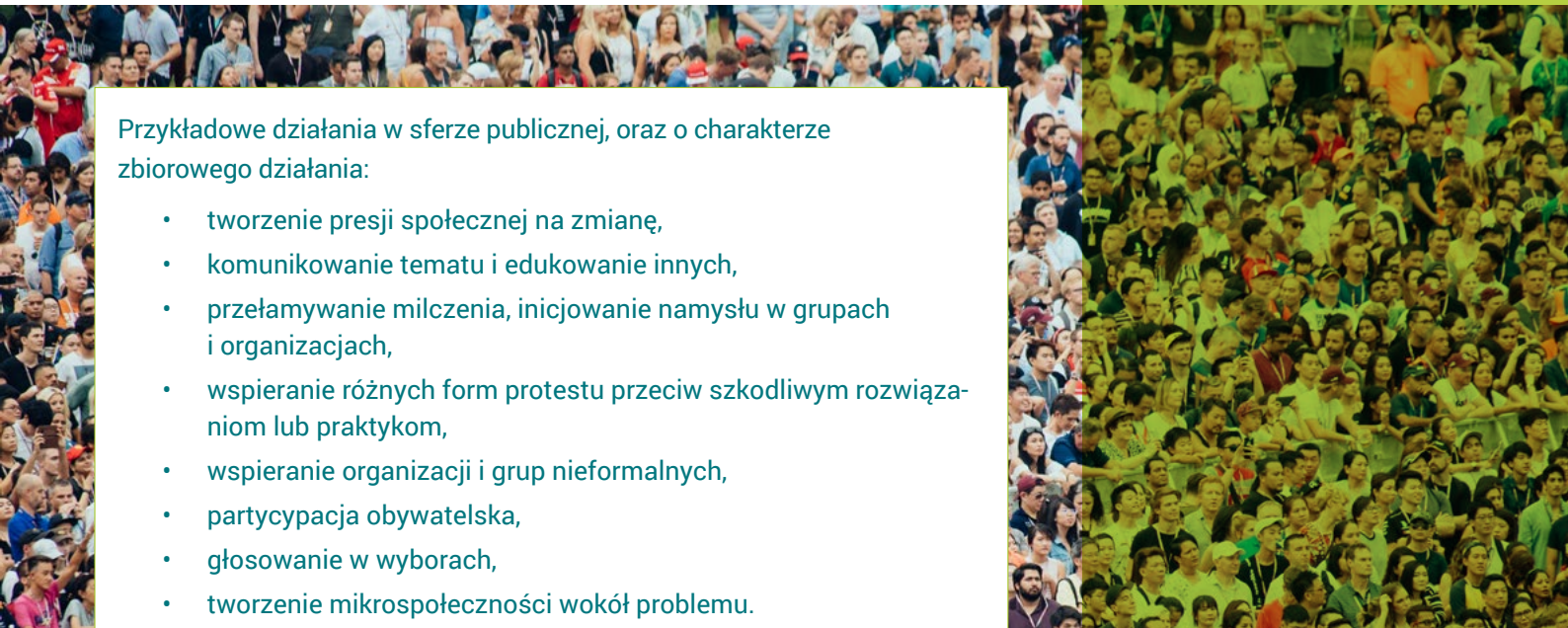


DZIAŁANIA ZBIOROWE

W sferze publicznej można aktywnie angażować się w pracę prośrodowiskowych ruchów społecznych lub organizacji. W obliczu kryzysu klimatycznego wiele takich ruchów tworzy się oddolnie na całym świecie. Niezwykle ważną zaletą działań w sferze publicznej jest to, że **zwiększają one społeczną świadomość danego problemu** (Stern, 2000). Te działania, chociaż wpływają na klimat tylko pośrednio, są nakierowane na doprowadzenie do transformacji systemowej, bez której zatrzymanie zmiany klimatu nie jest możliwe.



**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**



Przykładowe działania w sferze publicznej, oraz o charakterze zbiorowego działania:

- tworzenie presji społecznej na zmianę,
- komunikowanie tematu i edukowanie innych,
- przełamywanie milczenia, inicjowanie namysłu w grupach i organizacjach,
- wspieranie różnych form protestu przeciw szkodliwym rozwiązaniom lub praktykom,
- wspieranie organizacji i grup nieformalnych,
- partycypacja obywatelska,
- głosowanie w wyborach,
- tworzenie mikrospołeczności wokół problemu.

Granica między działaniami publicznymi a prywatnymi zaciera się, gdy ludzie osobiście kształtują działania organizacji i grup, do których należą. Przykładowo inżynierowie mogą wprowadzać przyjazne środowisku rozwiązania techniczne w maszynach, które projektują. Mieszkańcy mogą wpływać na politykę swojej spółdzielni mieszkaniowej lub miejscowości. Takie zachowania mają istotną rolę dla klimatu, ponieważ to właśnie sposoby działania organizacji w znacznym stopniu przyczyniają się do najpoważniejszych problemów środowiskowych (Stern, 2000).

Analizy prowadzone na podstawie międzynarodowych sondaży (Sevä & Kulin, 2018; Stern, 2000) potwierdzają, że w praktyce istnieje nie jedna, ale kilka różnych grup działań na rzecz środowiska. Odmienne grupy działań stanowią działania indywidualne (konsumenckie), działania zbiorowe o charakterze aktywizmu (udział w demonstracjach i ruchach protestu), zbiorowe o charakterze partycypacji obywatelskiej (udział w wyborach, pisanie petycji) i zbiorowe o charakterze poparcia dla zmian (poparcie dla polityki klimatycznej i zgoda na jej koszty). Działania te są deklarowane przynajmniej częściowo przez różne grupy osób i zależą też od różnych czynników. Przykładowo podjęcie działań zbiorowych jest zależne od poziomu zaufania do innych i tzw. kapitału społecznego w danym kraju (Sevä & Kulin, 2018). W przypadku klimatu to działania pośrednie (dążące do zmiany strukturalnej) mają potencjalnie największy wpływ. Co ciekawe, szczególnie ważnym i często niedocenianym rodzajem działania jest samo wyrażanie poparcia dla konieczności regulacji systemowych, w tym polityk klimatycznych, nawet jeśli wiązałoby się to z osobistymi kosztami.

Akcent na działania indywidualne może wyczerpywać wolę zmian politycznych

Werfel (2017) zademonstrował w badaniu eksperymentalnym, że kiedy ludziom przypomnieć o możliwości indywidualnych działań na rzecz klimatu (jak na przykład oszczędzanie energii w gospodarstwie domowym), mogą oni stawać się mniej skłonni, aby popierać strukturalne polityki rządowe zmierzające do ochrony klimatu.

W badaniu dotyczącym poparcia dla podatku węglowego przeprowadzonym w Japonii część uczestników wypełniała ankiety przypominające o narodowej akcji *setsuden* (oszczędzanie elektryczności). Uczestnicy zaznaczali również różne indywidualne działania ekologiczne, które sami podjęli (np. sortowanie śmieci). Okazało się, że osoby, którym przypomniano o indywidualnych działaniach, były mniej skłonne poprzeć podatek węglowy (Werfel, 2017). Badacze zinterpretowali ten wynik w taki sposób, że podjęcie działań indywidualnych może „wypychać” poparcie dla zmiany systemowej, ponieważ ludzie mogą czuć, że skoro indywidualne działania są możliwe, to one już wystarczą i nie potrzeba radykalnych zmian.



Więcej można przeczytać tu »



KOMUNIKACJA – WAŻNY MOST MIĘDZY INDYWIDUALNYM A ZBIOROWYM DZIAŁANIEM

Jakie jest – z perspektywy jednostki – najskuteczniejsze pojedyncze działanie, które można podjąć w odpowiedzi na kryzys klimatyczny? Niektóre analizy wskazują, że może być nim **zwykła rozmowa** – przy stole rodzinnym, z własną siostrą, babcią czy z najbliższą grupą znajomych. Goldberg, van der Linden, Maibach i Leiserowitz (2019) pokazali, że omawianie problemów klimatu w gronie bliskich osób może skutecznie prowadzić do większej akceptacji konsensusu naukowego na ten temat. Zaangażowanie nie pojedynczych osób, ale sieci osób połączonych bliskimi relacjami sprzyja przenoszeniu zaangażowania ze sfery prywatnej w publiczną i może spowodować samowzmacniającą się pętlę reakcji, kiedy to jedne osoby informują kolejne i pomagają im zaangażować się w działanie (Besta, Jaśko, Grzymała-Moszczyńska, Górską, 2019). Próba samotnego stawienia czoła problemom cywilizacyjnym jest bardzo obciążająca psychologicznie, podczas gdy wspólnotowy aspekt tego samego zaangażowania może działać wspierająco (APA, 2019). Można metaforycznie powiedzieć, że reagowanie na zmianę klimatu jest sportem zespołowym.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**



Ponadto w problemie adekwatnej reakcji na kryzys klimatyczny w społeczeństwach demokratycznych występuje problem uwikłanej sprawczości. W praktyce rządzący i decydenci, nawet gdyby chcieli, nie mogą podejmować radykalnych decyzji, jeśli ludzie ich nie zaakceptują. Z kolei obywatele mogą czuć się bezsilni, ponieważ makroprocesy nie są bezpośrednio zależne od działań jednostek. Rozwiązaniem jest stworzenie powszechnego społecznego konsensusu, w którym obywatele będą chcieli nie tylko zaakceptować, ale także aktywnie domagać się niezbędnych zmian i akceptować ich koszty. Może to zdarzyć się tylko wtedy, kiedy traktujemy ich nie jako bezmyślnych odbiorców bodźców ekonomicznych, lecz – jak w koncepcji ekonomii moralnej (Bowles, 2016) – zakładamy, że będą skłonni w wielu sytuacjach wybrać działania etyczne i aktywnie ze sobą współdziałać, nawet jeśli oznacza to koszty. W końcu stawka jest bardzo wysoka i jest nią między innymi przyszłość własnych dzieci, a to, także ewolucyjnie, jest wartością podstawową.

W pewnej mierze takie przesunięcie społeczne już się dzieje. Badania z 2020 roku pokazują (APA, 2020), że większość mieszkańców USA uważa zmianę klimatu za najpoważniejszy współczesny problem. Podobne wyniki uzyskujemy globalnie (Brehin & Bhandari, 2011). Także w Polsce, o czym wiesz już z lekcji 7, większość osób zasadniczo zauważa wagę problemu. Poziom niepokoju jest wprawdzie wyższy niż poziom rzeczywistej wiedzy. Jak pamiętasz z tej samej lekcji, to poprawna wiedza o zmianach klimatu łączyła się w badaniach z chęcią podejmowania działania (Kantar, 2019). Widać więc, że potencjał sprawczy nie tylko dla bezpośredniej komunikacji na temat klimatu, ale i dla różnych form edukacji, jest bardzo duży.

JAK ROZMAWIAĆ Z INNYMI NA TEMAT KLIMATU?

Kilka wskazówek o tym jak rozmawiać z innymi o zmianie klimatu znajdziesz w poniższym krótkim filmie. Przydadzą się one we wszystkich rozmowach na trudne tematy. Jaki zatem jest sekret?



Obejrzyj film »



O dalszych wskazówkach, jak inteligentnie i empatycznie rozmawiać z innymi na temat klimatu, możesz przeczytać tutaj »



ROLA DZIAŁAŃ INDYWIDUALNYCH W TWORZENIU WZORCÓW I NORM ETYCZNYCH

Dyskusja na temat wzajemnych związków działań indywidualnych i zbiorowych jest złożona. Obok możesz przeczytać dwa różne głosy na ten temat.

Być może połączenie tych perspektyw jest możliwe, dzięki temu, na co wskazuje perspektywa psychologii społecznej. W badaniu dotyczącym osób świadomie redukujących swój własny ślad węglowy (Howell, 2013) pokazano, że najczęstszymi motywami działania były: poczucie powiązania z innymi, pragnienie pomocy innym (zwłaszcza w skali lokalnej), oszczędność oraz poczucie prawości. Podkreślano także rolę wartości czy chrześcijańskiego wychowania, troskę o prawa człowieka itp. U większości uczestników tego badania motyw altruistyczny był dominujący i przeważał nad egocentrycznymi i biosferycznymi. Powstrzymanie zmiany klimatu było postrzegane przez osoby angażujące się osobiście jako wartość etyczna i zobowiązanie moralne względem innych ludzi i przyszłych pokoleń.

Z tej perspektywy ważną zaletą indywidualnych działań jest nie tyle redukcja śladu węglowego, co ich rola w tworzeniu normy etycznej, dawaniu przykładu i demonstrowaniu nowych postaw we własnym środowisku. To samo dzieje się, kiedy jednostki tworzą swoimi zachowaniami normę dotyczącą angażowania się w życie publiczne, choćby przez uczestnictwo w manifestacjach czy członkostwo w ruchach społecznych. Wiele osób angażujących się w ten sposób ma w swoich rodzinach i wśród znajomych osoby, które także tak robią. To właśnie takie sieci społeczne ułatwiają trwałe zaangażowanie (Besta, Jaśko, Grzymała-Moszczyńska, Górka, 2019).

Samuel Bowles (2016) w książce *„The Moral Economy: Why Good Incentives Are No Substitute for Good Citizens”* podkreśla, że samo istnienie zachęt ekonomicznych czy kar nie wystarcza, aby ludzie zaczęli zachowywać się w pożądanym sposób. Mechanizmy ekonomiczne mogą wręcz korumpować zachowania prospołeczne, gdy zaczynają one być traktowane wyłącznie jako transakcje handlowe, niebiorące pod uwagę zasad moralnych i norm. Reagowanie na kryzys klimatyczny ma niewątpliwie wymiar etyczny. W końcu od tego zależy bezpośrednio przyszłość naszych dzieci i ryzyko katastrofy humanitarnej, o skali bez precedensu w historii. Zapobieżenie temu stanowi wyzwanie etyczne i moralne, być może największe dla współcześnie żyjących ludzi. Działania indywidualne, nawet drobne, często mają wymiar etyczny i dobrze jeśli dyskusja o nich nie odwraca uwagi od konieczności systemowych rozwiązań, a wręcz prowadzi do nacisku na ich stworzenie. Wtedy mogą one stać się niezbędnym krokiem do zmiany.



Więcej o krytyce podejścia opartego wyłącznie na działaniach indywidualnych można przeczytać między innymi w tekście Derricka Jensena pod tytułem *„Ułuda krótkiego prysznica”* »



Z drugiej strony, o znaczeniu działań indywidualnych i tym, że regulacje nie są w stanie zastąpić indywidualnej etyki oraz współodpowiedzialności obywateli można przeczytać w tekście Karoliny Safarzyńskiej, w którym łączy ona temat kryzysu ekonomicznego z aktualnym w 2020 roku kryzysem pandemii koronawirusa. Autorka wyciąga wniosek, że indywidualne postawy etyczne i współodpowiedzialność obywateli mają decydujące znaczenie, także w obliczu makrokryzysów. »

„Podział rynek – państwo – społeczeństwo wydaje się anachronizmem wobec kryzysów, które wymagają wszechkiernej, skomplikowanej i wielopoziomowej współpracy.”

Fragment tekstu Karoliny Safarzyńskiej



NAUKA Z HISTORII DUŻYCH ZMIAN SPOŁECZNYCH

Wiele z działań w sferze publicznej wymienionych powyżej jest formami oporu obywatelskiego (*civil resistance*). Badaczki Chenoweth i Stephan (2011, 2014) przeprowadziły rygorystyczną analizę ponad 300 ruchów obywatelskich – zarówno pokojowych, jak i takich, w których używano przemocy, odbywających się w XX i na początku XXI wieku w różnych rejonach świata. Te ruchy wyrastały na arenie dużych zmian politycznych, a nie klimatycznych. Co jednak ważne w obecnym kontekście, to ruchy pokojowe okazały się przyciągać więcej osób niż ruchy zbrojne. Jako większe miały większe szanse zakłócić status quo funkcjonowania danego państwa, używając przy tym kombinacji różnych – wyłącznie pokojowych – metod (np. protestów ulicznych i bojkotów konsumenckich). Ich powszechność sprawiała, że z czasem przeciągały na swoją stronę elity, władze religijne czy przedstawicieli mediów. Te czynniki przyczyniły się do tego, że ruchy pokojowe dwa razy częściej osiągały swój cel w porównaniu do ruchów zbrojnych (Chenoweth & Stephan, 2014). Jednym z ruchów, które omawiają autorki, jest zresztą ruch Solidarności, który pokojowo doprowadził do upadku komunizmu w Polsce i spełnił omawiane przez autorki warunki – był ruchem powszechnym, przyciągającym różne osoby cieszącym się poparciem bardzo różnych grup społecznych i jednoczącym je we wspólnym działaniu.

Poważne zmiany społeczne, zmieniające wartości i zasady funkcjonowania całych państw, w tym także ich gospodarek zdarzały się w historii wielokrotnie. Niektóre z tych zmian, choć traktujemy je współcześnie jako oczywiste, miały miejsce względnie niedawno. Zniesienie niewolnictwa dokonywało się w kolejnych krajach w różnych latach, jednak w przybliżeniu w wielu miejscach na świecie minęło od tej zmiany niecałe 200 lat. Było to możliwe na skutek nie tylko protestów i ruchu społecznego dążącego do zniesienia niewolnictwa, ale także dzięki upowszechnieniu się nowej normy etycznej, która uznała tę tradycyjną praktykę, na której przecież od starożytności opierały się całe gospodarki, za niedopuszczalną. Podobną historię mają ruchy dotyczące praw kobiet. Czynne i bierne prawo wyborcze kobiet to w Polsce kwestia zaledwie niewiele ponad 100 lat (niedawno świętowaliśmy stulecie). Co ciekawe, zmiany tego rodzaju mogą dokonywać się szybko i skokowo. Daje to nadzieję na przyszłość, bo pokazuje, że gdy sytuacja tego wymaga, społeczeństwa potrafią zmienić sposób działania szybko i trwale, odrzucając zasady, które do momentu zmiany wydawały się nienaruszalne. Dlatego, mimo iż jest już bardzo późno, nie wiemy, w jaki sposób będzie kształtować się przyszłość klimatu. W tej sprawie wiele zależy od tego, co ostatecznie zrobią ludzie i społeczeństwa.

Ile mamy czasu? Wpływ ludzi na klimat i środowisko naturalne jest z każdym rokiem większy. Świadomość skali tych zmian i tego, że są one coraz większe, może być przytłaczająca. Niektórzy ludzie pod wpływem tych faktów dochodzą do wniosku, że czas na skuteczne przeciwstawianie się tym trendom już minął, że odwrócenie niekorzystnych zmian nie jest już możliwe. Taka reakcja może być zrozumiała, jednak fakty nie potwierdzają jej słuszności. Pomimo istnienia dodatknych pętli zwrotnych, przyspieszających tempo zmian, w dalszym ciągu to ludzka działalność w dominującym stopniu odpowiada za nasilenie efektu cieplarnianego. Ocenia się, że dopiero przy ociepleniu przekraczającym 2°C względem epoki przedprzemysłowej znacząco rośnie prawdopodobieństwo przekroczenia przez Ziemię progu planetarnego, a więc uruchomienia lawiny zjawisk, które mogą okazać się w dużej części nieodwracalne, i które popchną system klimatyczny w stronę nowego stanu równowagi (Steffen i in., 2018).

Zwróć uwagę, że (jak podkreślaliśmy w lekcji 2) mówimy tu o prawdopodobieństwie. Nie możemy zatem określić, kiedy dokładnie próg planetarny zostanie przekroczony. Dowiemy się o tym po fakcie. Dopóki to nie nastąpiło, cały czas mamy możliwość obniżenia ryzyka takiego zdarzenia.

Zarówno dziś, jak i w kolejnych dekadach, to decyzje ludzi będą w największym stopniu kształtować klimat, więc ludzie mogą te zmiany zarówno potęgować, jak i zmniejszać.

WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ



25 pytań i odpowiedzi na temat zmiany klimatu

Przygotowane przez naukowców współpracujących z zespołem:
Uniwersytet Warszawski dla Klimatu. Dr Magdalena Budziszewska,
dr Jakub Jędrak, dr Aleksandra Kardaś, prof. Szymon Malinowski.

1. Czy klimat Ziemi naprawdę się ociepla?

Tak. Pokazują to pomiary temperatury. Mamy do dyspozycji m.in. dane ze stacji meteorologicznych na lądach, boi pomiarowych w oceanie czy satelitów. Obserwujemy też globalne zjawiska potwierdzające ocieplenie takie, jak topnienie lodowców i lądolodów.

2. Jak bardzo wzrosła już temperatura Ziemi?

Od początku rewolucji przemysłowej średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrosła już o około 1°C. Nie wszędzie wzrost temperatur jest taki sam: lądy ocieplają się szybciej niż oceany, szczególnie szybko ociepla się Arktyka.

3. Ale ociepleniem o jeden, dwa stopnie chyba nie trzeba się przejmować?

To częste nieporozumienie. Nie mówimy o zmianie pogody, ale o zmianie średniej temperatury planety. Ziemia o kilka stopni cieplejsza to zupełnie inna planeta niż ta, którą znamy.

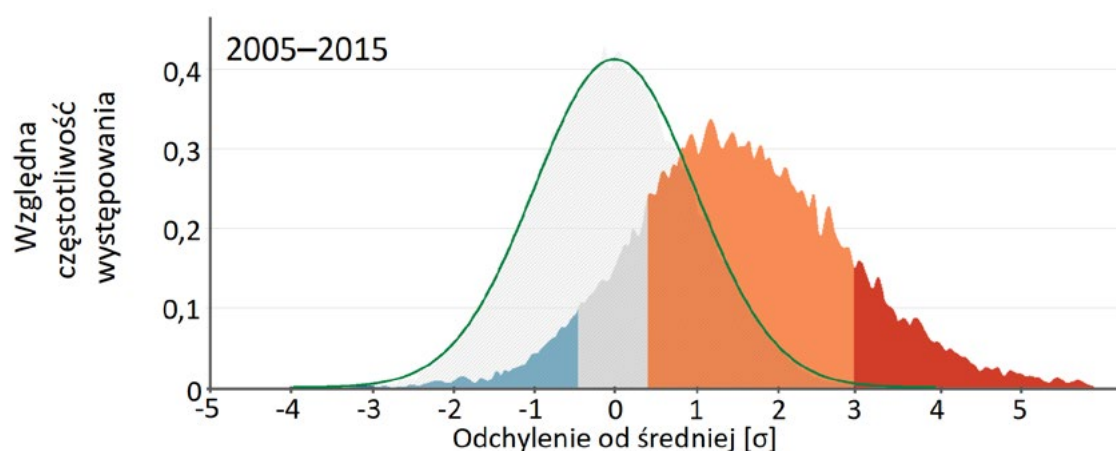
4. „Globalne ocieplenie” czy „zmiana klimatu”?

Można używać obu sformułowań. „Globalne ocieplenie” oznacza wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi. „Zmiana klimatu” to szerszy termin, sygnalizujący, że zmieniają się także inne parametry – na przykład miejsca i terminy występowania opadów.

5. Co zmiana średniej temperatury oznacza w praktyce?

Kiedy średnia temperatura rośnie, to o każdej porze roku wyjątkowo ciepłe dni zdarzają się coraz częściej, a odchylenia od tego, co do tej pory było normą, są większe. Konsekwencją zmiany klimatu jest też większa liczba ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak huragany, gwałtowne opady czy długie okresy bez deszczu.

Na rysunku poniżej widać, jak zmieniły się częstotliwości występowania różnych temperatur powietrza nad lądami półkuli północnej (dane dla dekad 2005–2015 w porównaniu do lat 1951–1980).



6. Wciąż jednak zdarzają się czasem wyjątkowo zimne dni, a nawet śnieżyce w nietypowych dla takich zjawisk porach roku. Może to dowód, że globalne ocieplenie się skończyło?

Nie. Globalne ocieplenie oznacza wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi. Nie wyklucza występowania lokalnych i okresowych ochłodzeń. Dodatkowo, zmiana klimatu powoduje zwiększenie zakresu zmienności warunków pogodowych, a w niektórych lokalizacjach może sprzyjać „atakowi zimy”. Jednocześnie w innych regionach często występują wtedy temperatury wyższe od średniej.

7. A jak szybko zmienia się klimat Polski?

W naszym kraju w ciągu ostatnich 30-40 lat średnia temperatura wzrosła już przynajmniej ok. 2°C. Średnia temperatura dla obecnego terytorium Polski w latach 1851–1900 wyniosła 7,2°C. W roku 2019 średnia temperatura wyniosła 10,3°C. W Polsce lata 2018 i 2019 były najcieplejsze w historii pomiarów.

8. Skąd się wzięła współczesna zmiana klimatu?

Spalając paliwa kopalne – węgiel kamienny i brunatny, ropę naftową i gaz ziemny – emitujemy dwutlenek węgla (CO_2). Uwalniamy do atmosfery węgiel, którego zmagazynowanie w paliwach kopalnych wymagało milionów lat. Emitujemy także inne gazy cieplarniane. Wzrost ich stężenia w atmosferze jest głównym czynnikiem odpowiedzialnym za zachodzące obecnie gwałtowne ocieplanie się planety.

9. Czy jednak na pewno obecna zmiana klimatu jest skutkiem działalności człowieka? A może jest to część jakiegoś naturalnego cyklu, na który nie mamy wpływu?

Obecna zmiana klimatu pokazuje, że wytrąciliśmy system klimatyczny z jego naturalnych cykli. Gdyby nie nasze działania, to w tej chwili Ziemia powinna powoli się ochładzać. Emisje gazów cieplarnianych odwróciły ten naturalny trend i zastąpiły szybkim ocieplaniem się klimatu. Wszystkie duże towarzystwa naukowe są zgodne, że obecna zmiana klimatu jest skutkiem działalności człowieka.

10. Słyszałem, że nasza emisja dwutlenku węgla to tylko mały ułamek naturalnych emisji tego gazu.

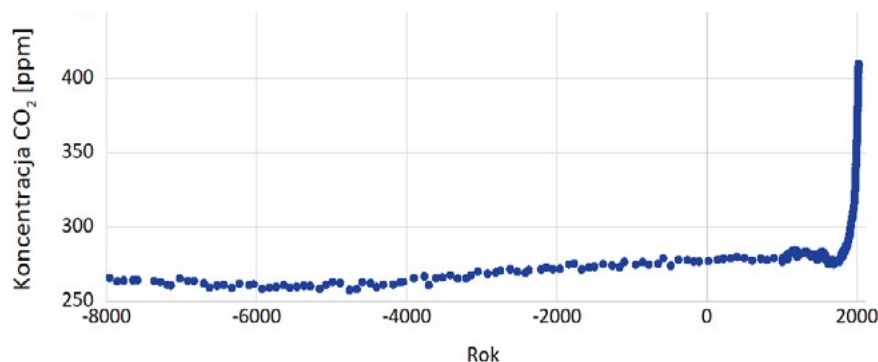
Jest to kolejne z najczęstszych nieporozumień. Emisje, których źródłem są m.in. przemiana materii w organizmach żywych, rozkład materii organicznej czy oceany, stanowią część cyklu, który jest zasadniczo zrównoważony. Natura uwalnia mniej więcej tyle samo CO_2 , co pochłania. Natomiast ludzie, spalając paliwa kopalne, każdego roku wprowadzają do atmosfery dodatkową, niezbilansowaną ilość CO_2 . To ta kumulująca się nadwyżka odpowiada za zmianę klimatu.

11. A jaki udział w emisji dwutlenku węgla mają wulkany?

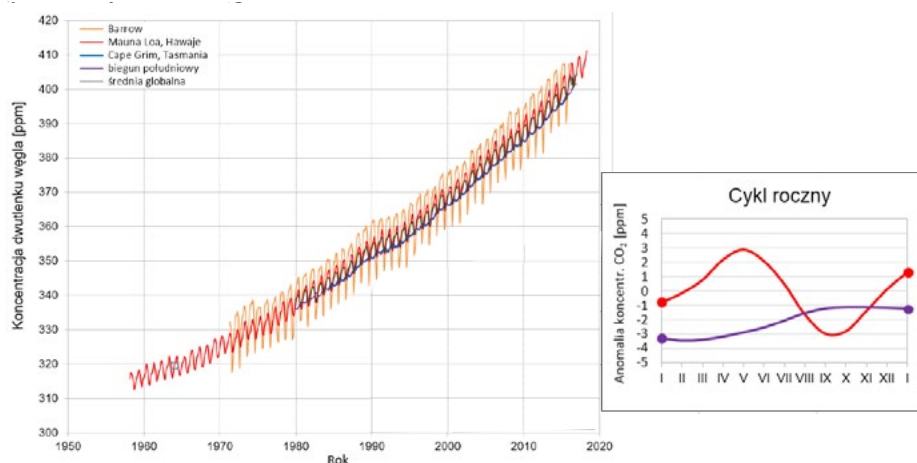
Wulkany na całym świecie każdego roku emitują (średnio) ok. 300 mln ton CO_2 . To mniej więcej tyle ile emituje Polska – odpowiednik 1% światowych emisji dwutlenku węgla związanych z działalnością człowieka.

12. Jak w takim razie zmieniło się stężenie CO₂ w atmosferze?

Do połowy XVIII wieku koncentracja CO₂ w atmosferze wynosiła ok. 280 ppm (części albo cząsteczek na milion), natomiast obecnie jest to już około 410 ppm (średnia roczna). Chodzi tu o stężenie tła, mierzone z dala od wszelkich źródeł emisji CO₂.



Jednak od końca XVIII wieku stężenie tła CO₂ w atmosferze stale rośnie, szczególnie szybko w ciągu kilku ostatnich dekad:



Za wyraźnie widoczne, regularne oscylacje poziomu CO₂ w ciągu roku odpowiadają sezonowe zmiany pochłaniania tego gazu związane z okresem wegetacyjnym na półkuli północnej.

Od początku rewolucji przemysłowej wyemitowaliśmy więcej CO₂, niż było go początkowo w atmosferze. To, że stężenie CO₂ wzrosło w tym czasie zaledwie o około 50%, zawdzięczamy temu, że część wyemitowanego CO₂ jest pochłaniana przez oceany, roślinność i glebę.

13. Jaki wpływ na stężenie CO₂ w powietrzu wywierają oceany?

Morza i oceany pochłaniają obecnie z atmosfery więcej CO₂, niż go do niej emitują. Wraz ze wzrostem temperatury, sytuacja ta może niestety ulec zmianie – w cieplejszej wodzie rozpuszczalność CO₂ jest mniejsza.

14. Czy nadmiar CO₂ w atmosferze ma jeszcze jakieś konsekwencje poza wpływem na klimat?

W niedalekiej przyszłości rosnące stężenie CO₂ w powietrzu, którym oddychamy, będzie negatywnie wpływać na nasze samopoczucie i sprawność intelektualną – tak jak ma to miejsce w dusznym, niewietrzonej pomieszczeniu. Im wyższe stężenie tła CO₂, tym trudniej będzie jest zapewnić dobrą jakość powietrza (niskie stężenie CO₂) w rejonach miejskich i wewnątrz budynków.

Szybkie rozpuszczanie się dużych ilości CO₂ w oceanie prowadzi do jego zakwaszania – procesu niekorzystnego dla wielu organizmów, także tych stanowiących podstawę morskich łańcuchów pokarmowych. Może to odbić się na całym ekosystemie oceanicznym i doprowadzić do jego załamania.

15. Czy dwutlenek węgla jest jedynym gazem cieplarnianym?

Nie. Najważniejsze gazy cieplarniane poza dwutlenkiem węgla (CO_2) to para wodna (H_2O), metan (CH_4) i tlenek azotu (I) (N_2O), ozon (O_3) oraz fluorowęglowodory i chlorofluorowęglowodory (freony). Największy wpływ na obecną zmianę klimatu mają dwutlenek węgla i metan. Para wodna łatwo się skrapla, a jej ilość w atmosferze zależy od temperatury. Nie da się trwale zwiększyć jej ilości w atmosferze inaczej, niż ocieplając klimat. Para wodna nie powoduje zmian klimatu, ale je nasila.

16. Co wspólnego mają globalne ocieplenie i smog?

To dwa różne, choć powiązane problemy. Niestety, duża część działań anty-smogowych nie spowalnia zmiany klimatu. Ich celem jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia, a nie gazów cieplarnianych.

17. W jaki sposób nadmiar gazów cieplarnianych w atmosferze wpływa na temperaturę na powierzchni Ziemi?

Średnia temperatura powierzchni Ziemi to efekt równowagi pomiędzy energią otrzymywaną przez planetę od Słońca i wypromieniowywaną przez nią w kosmos. Gazy cieplarniane utrudniają ucieczkę energii z powierzchni Ziemi – na tym polega efekt cieplarniany. Gdy ich stężenie rośnie, efekt cieplarniany nasila się, coraz więcej energii jest zatrzymywane w atmosferze i średnia temperatura powierzchni Ziemi rośnie.

18. Skąd wiemy, że z powierzchni Ziemi w przestrzeń kosmiczną ucieka mniej energii niż kiedyś?

Pokazują to pomiary satelitarne. A pomiary prowadzone na powierzchni pokazują, że wzrasta natężenie promieniowania podczerwonego pochodzącego z atmosfery.

19. Gdzie podziewa się dodatkowa energia, związana z nadmiarem gazów cieplarnianych w atmosferze?

Ponad 90% tej nadwyżki energii przejmują ogrzewające się oceany. Reszta powoduje topnienie lodów oraz ogrzanie powierzchni lądów i atmosfery. Ilość energii trafiająca do oceanów jest ogromna – w każdej sekundzie odpowiada energii wyzwolonej podczas wybuchu 4 bomb atomowych takich jak ta zrzucona na Hiroszimę.

20. Jakie są przewidywane konsekwencje zmiany klimatu?

Jeśli szybko nie zaprzestaniemy emisji gazów cieplarnianych, to za kilkadziesiąt lat na znacznych obszarach naszej planety regularnie będą występować temperatury za wysokie, by mogły przeżyć zwierzęta stałocieplne, w tym ludzie. Coraz częstsze będą katastrofalne susze i inne ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak huragany czy nawałne opady.

Wzrost poziomu morza spowoduje postępujące zatapianie obszarów nadbrzeżnych, gdzie mieszka znaczna część populacji świata, a w konsekwencji głód, epidemie, migracje i rosnące ryzyko konfliktów zbrojnych. W każdej części świata, w zmienionym klimacie nie będzie mogło żyć wiele gatunków roślin i zwierząt, które żyły tam do tej pory. Syberyjska tajga może zamienić się w step, a równikowe lasy Amazonii w sawannę.

21. A co nam grozi w Polsce? Może to nawet lepiej, że jest u nas trochę cieplej niż kiedyś?

Już teraz w Polsce negatywne skutki ocieplenia klimatu, takie jak fale upałów, susza i pożary lasów przeważają nad nielicznymi skutkami pozytywnymi. Susza w naszym kraju nie jest spowodowana wyłącznie zmianą klimatu. Jednak brak wody z topiącego się po zimie śniegu i zwiększone przez wyższe temperatury parowanie sprawiają, że zagrożenie suszą jest większe. Z czasem negatywne konsekwencje zmiany klimatu będą w Polsce coraz poważniejsze.

22. Co to są sprzężenia zwrotne w systemie klimatycznym?

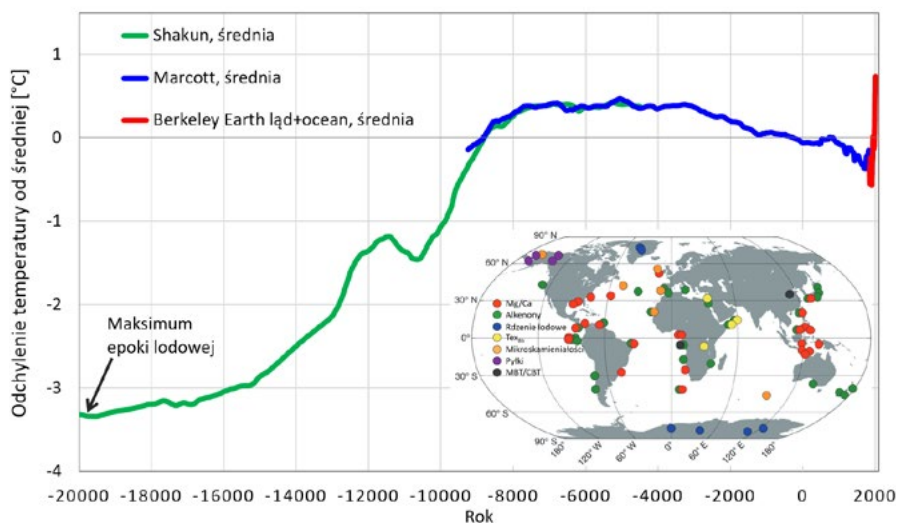
To zjawiska występujące w odpowiedzi na zmianę klimatu, mogące ją wzmacniać lub osłabiać. Na przykład topniejąca wieloletnia zmarzlina uwalnia dwutlenek węgla i metan, co zwiększa stężenia tych gazów cieplarnianych w atmosferze i powoduje szybsze ocieplenie się klimatu. Obecnie większość działających sprzężeń wzmacnia zmianę klimatu. Jeśli podgrzejemy naszą planetę za bardzo, to uruchomimy kaskadę takich procesów, które będą napędzać się nawzajem, powodując „efekt domina”.

23. Co to są punkty krytyczne systemu klimatycznego?

Punkt krytyczny (ang. *tipping point*) to taki stan ziemskiego klimatu, po osiągnięciu którego rozpoczyna się jakiś praktycznie nieodwracalny proces, wpływający na system klimatyczny. Przykładowo, jeśli stopi się lądolód Grenlandii, to nie odbuduje się on w wyobrażalnej dla nas skali czasowej, a jego utrata będzie mieć wpływ na klimat całej planety.

24. Czy to prawda, że zmiana klimatu mogłaby zniszczyć dużą część biosfery i zagrozić przetrwaniu ludzkiej cywilizacji?

W najgorszym, ale niestety dość realistycznym scenariuszu – tak. Przypomnijmy, że kiedy średnia temperatura Ziemi była o około 4°C niższa niż współcześnie, nasza planeta znajdowała się w maksimum ostatniej epoki lodowej (rysunek poniżej), a większość Polski była pokryta kilkusetmetrową warstwą lodu.



Wzrost temperatury o kilka stopni w stosunku do holocenu – okresu stabilnego klimatu, w którym rozwinęła się ludzka cywilizacja – sprawiłby, że na Ziemi zapanują warunki skrajnie różne od tych, które znamy. Zmiany te zachodzą w szybkim tempie, utrudniając przystosowanie się do nich. Dodatkowo, jeśli ocieplenie przekroczy pewną wartość krytyczną, to dalej będzie postępowało samo, nawet jeśli całkowicie przestaniemy emitować gazy cieplarniane. W takim scenariuszu Ziemia stałaby na większości swojego obszaru niezdatna do zamieszkania dla ludzi.

25. Co powinniśmy zrobić by zatrzymać zmiany klimatyczne?

Musimy przeorganizować wszystkie nasze działania i dziedziny życia tak, by nie wiązały się z emisjami gazów cieplarnianych. W szczególności musimy przestać spalać paliwa kopalne i zmienić sposób w jaki produkujemy żywność. Musimy też pilnie otoczyć ochroną przyrodę, w tym oceany, tak by złagodzić destrukcyjny wpływ naszej cywilizacji i zmiany klimatu na ekosystemy. Na te wszystkie działania mamy niestety mało czasu.



BIBLIOGRAFIA

LEKCJA 1

Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J.A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N.K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C.B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestad, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneros, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K.J., Marotzke, J., Mastrandrea, M.D., Meyer, L., Minx, J., Muluetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J.J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G.-K., Pörtner, H.-O., Power, S.B., Preston, B., Ravindranath, N.H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T.F., Tschakert, P., van Vuuren, D., van Ypersele, J.-P. (red.) (2014). **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Genewa, Szwajcaria: IPCC.

IPCC (2018). Summary for Policymakers. W: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T. (red.) **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. Pobrane z: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).

LEKCJA 2

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J. (2008). **Tippling elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences**, 105 (6), s. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). **Nauka o klimacie**. Warszawa: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum i Wydawnictwo Nieoczywiste.

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelman, R., Schellnhuber, H.J. (2018). **Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the National Academy of Sciences**, 115(33), s. 8252-8259. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

Wild, M. i in. (2013). **Observations: Atmosphere and Surface**. W: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (red.), **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (s. 159-254). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, Stany Zjednoczone Ameryki Północnej: Cambridge University Press.

LEKCJA 3

Berner, R.A., Maasch, K.A. (1996). **Chemical weathering and controls on atmospheric O₂ and CO₂: Fundamental principles were enunciated by J.J. Ebelmen in 1845. Geochimica et Cosmochimica Acta**, 60(9), s.1633-1637. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00104-4.

Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V., Midgley P.M. (red.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental**

Panel on Climate Change (s. 465-570). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, NY, USA: Cambridge University Press.

Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P.L., Wofsy S.C., i Zhang, X. (2007): **Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry**. W: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.M. (red.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (s. 499-588). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, NY, USA: Cambridge University Press.

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D.C.E., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Currie, K.I., Feely, R.A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D.S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R.A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer E., Kaplan, J.O., Kato, E., Klein Goldewijk, K., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozi, D., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Metz, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Neill, C. Omar, A.M., Ono, T., Peregón, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Werf, G.R., Wiltshire, A.J., Zaehle, S. (2019). **Global Carbon Budget 2019**. *Earth System Science Data*, 11, s. 1783-1838. DOI: 10.5194/essd-11-1783-2019.

Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., Zeebe, R., Kump, L., Martindale, R. C., Greene, S.E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J.C., Royer, D.L., Barker, S., Marchitto, T.M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G.L., Williams, B. (2012). **The Geological Record of Ocean Acidification**. *Science*, 335, s. 1058-1063. DOI: 10.1126/science.1208277.

Hiederer, R., Köchy, M. (2011). **Global Soil Organic Carbon Estimates and the Harmonized World Soil Database**. Pobrane z: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR25225.pdf (dostęp: 09.01.2020).

Lee, C-T A, Jiang, H., Dasgupta, R. Torres, M. (2019). **A Framework for Understanding Whole-Earth Carbon Cycling**. W: Orcutt, B.N., Dasgupta, R. (red.) **Deep Carbon: Past to Present** (s. 313-357). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, NY, USA: Cambridge University Press.

Lord, N.S., Ridgwell, A., Thorne, M.C., Lunt, D.J. (2015). **An impulse response function for the "long tail" of excess atmospheric CO₂ in an Earth system model**. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, s. 2-17. DOI: 10.1002/2014GB005074.

Nichols, J.E., Peteet, D.M. (2019). **Rapid expansion of northern peatlands and doubled estimate of carbon storage**. *Nature Geoscience*, 12, s. 917-921. DOI: 10.1038/s41561-019-0454-z.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). **Nauka o klimacie**. Warszawa: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum i Wydawnictwo Nieoczywiste.

Ruesch, A., Gibbs, H.K. (2008). **New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000**. Pobrane z: <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov> (Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, dostęp 09.01.2020).



BIBLIOGRAFIA

Yu, Z., Loisel, J., Brosseau, D.P., Beilman, D.W., Hunt, S.J. (2010): **Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum**. *Geophysical Research Letters*, 37, s. L13402-1–L13402-5, DOI: 10.1029/2010GL043584.

World Meteorological Organization (2019). **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere**.

Based on Global Observations through 2018. WMO Greenhouse gas bulletin, 15, s.1-8. Pobrane z: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620 (dostęp: 18.01.2020).

LEKJA 4

Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex V., Midgley P.M. (red.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (s. 465-570). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy York, NY, USA: Cambridge University Press.

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D.C.E., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Currie, K.I., Feely, R.A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D.S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R.A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzer E., Kaplan, J.O., Kato, E., Klein Goldewijk, K., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozi, D., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Neill, C. Omar, A.M., Ono, T., Peregón, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Werf, G.R., Wiltshire, A.J., Zaehle, S. (2019). **Global Carbon Budget 2019**. *Earth System Science Data*, 11, s. 1783–1838. DOI: 10.5194/essd-11-1783-2019.

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B. (2013). **Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities**. Pobrane z: <http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf> (dostęp: 20.01.2020).

IPCC (2014). Summary for Policymakers. W: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, J.C. (red). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania i Nowy York, NY, USA: Cambridge University Press.

PBL Netherland Environmental Assessment Agency (2017). **Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2017 report**. Pobrane z: <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2017-report> (dostęp 20.01.2020).

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). **Nauka o klimacie**. Warszawa: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum i Wydawnictwo Nieoczywiste.

Saunio, M., Staver, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., Ciais, P., Arora, V.K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D.R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K.M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N.,

Crevoisier, C., Crill, P.M., Covey, K., Curry, C.L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M. I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K.M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P.B., Langenfelds, R.L., Laruelle, G.G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K.C., McNorton, J., Miller, P.A., Melton, J.R., Morino, I., Müller, J., Murgia-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R. J., Peng, C., Peng, S., Peters, G.P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W.J., Rosentreter, J.A., Segers, A., Simpson, I.J., Shi, H., Smith, S.J., Steele, L.P., Thornton, B.F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F.N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T.S., van Weele, M., van der Werf, G.R., Weiss, R.F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q., Zhuang, Q. (2019). **The Global Methane Budget 2000–2017. Earth System Science Data**, s.1-36. DOI: 10.5194/essd-2019-128 (w recenzji).

Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., Figueroa Meza, M.J., Fulton, L., Kobayashi, S., Lah, O., McKinnon, A., Newman, P., Ouyang, M., Schauer, J.J., Sperling, D., Tiwari, G. (2014) Transport. W: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T., Minx J.C. (red). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania i Nowy York, NY, USA: Cambridge University Press.

United Nations Environment Programme (2019). **Emissions Gap Report 2019**. Nairobi, Kenia: UNEP. Pobrane z: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019> (dostęp: 20.01.2020).

World Meteorological Organization (2018). **Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring**. Geneva, Szwajcaria. Pobrane z: <http://ozone.unep.org/science/assessment/sap> (dostęp: 19.01.2020).

World Meteorological Organization (2019). **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. WMO Greenhouse gas bulletin**, 15, s.1-8. Pobrane z: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620 (dostęp: 18.01.2020).

LEKJA 5

Ansari, S. (shaz), Wijan, F., & Gray, B. (2013). **Constructing a Climate Change Logic: An Institutional Perspective on the "Tragedy of the Commons"**. *Organization Science*, 24(4), 1014-1040. <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0799>

Hardin, G. (1968). **The tragedy of the commons. The population problem has no technical solution; it requires a fundamental extension in morality**. *Science*, 162(3859), 1243-1248. <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>

Tol, R. (2014). **Climate economics – economic analysis of climate, climate change and climate policy (p. 208)**. Edward Elgar. <http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/49671/>

LEKJA 6

Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., Vazquez Aguirre, J.L. (2006). **Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation**. *Journal of Geophysical Research*, 111(D5), s. D05109-1 – D05109-22. DOI: 10.1029/2005JD006290

BIBLIOGRAFIA

- Allan, R.P., Liu, C., Loeb, N.G., Palmer, M.D., Roberts, M., Smith, D., Vidale, P.-L. (2014). **Changes in global net radiative imbalance 1985–2012**. *Geophysical Research Letters*, 41 (15), s. 5588–5598. DOI: 10.1002/2014GL060962.
- Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Landa, C.S., Metzl, N., O'Brien, K.M., Olsen, A., Smith, K., Cosca, C., Harasawa, S., Jones, S.D., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Schuster, U., Steinhoff, T., Sweeney, C., Takahashi, T., Tilbrook, B., Wada, C., Wanninkhof, R., Alin, S.R., Balestrini, C. F., Barbero, L., Bates, N.R., Bianchi, A.A., Bonou, F., Boutin, J., Bozec, Y., Burger, E.F., Cai, W.-J., Castle, R.D., Chen, L., Chierici, M., Currie, K., Evans, W., Featherstone, C., Feely, R.A., Fransson, A., Goyet, C., Greenwood, N., Gregor, L., Hankin, S., Hardman-Mountford, N.J., Harlay, J., Hauck, J., Hoppema, M., Humphreys, M.P., Hunt, C. W., Huss, B., Ibáñez, J.S. P., Johannessen, T., Keeling, R., Kitidis, V., Körtzinger, A., Kozyr, A., Krasakopoulou, E., Kuwata, A., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lo Monaco, C., Manke, A., Mathis, J. T., Merlivat, L., Millero, F. J., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Murata, A., Newberger, T., Omar, A.M., Ono, T., Paterson, K., Pearce, D., Pierrot, D., Robbins, L.L., Saito, S., Salisbury, J., Schlitzer, R., Schneider, B., Schweitzer, R., Sieger, R., Skjelvan, I., Sullivan, K.F., Sutherland, S.C., Sutton, A.J., Tadokoro, K., Telszewski, M., Tuma, M., van Heuven, S.M.A.C., Vandemark, D., Ward, B., Watson, A.J., and Xu, S. (2016). **A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT)**. *Earth System Science Data*, 8, s. 383–413. DOI: 10.5194/essd-8-383-2016.
- Böhm, F., Haase Schramm, A., Eisenhauer, A., Dullo, W. C., Joachimski, M.M., Lehnert, H., Reitner, J. (2002). **Evidence for preindustrial variations in the marine surface water carbonate system from coralline sponges**. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 3(3), s. 1–13. DOI: 10.1029/2001GC000264.
- Brindley, H.E., Bantges, R.J. (2016). **The spectral signature of recent climate change**. *Current climate change*, s. 112–126. DOI: 10.1007/s40641-016-0039-5.
- Burton, M.R., Sawyer, G.M., Granieri, D. (2013). **Deep Carbon Emissions from Volcanoes**. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1), s. 323–354. DOI: 10.2138/rmg.2013.75.1.
- Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S., Thornton, P. (2013): **Carbon and Other Biogeochemical Cycles**. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (s. 465–570). Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, NY, USA: Cambridge University Press.
- Dlugokencky, E., Tans, P. (2020). **Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory** (NOAA/ESRL), <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>, (dostęp: 24.02.2020).
- Donat, M.G., Alexander, L.V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Caesar, J. (2013). **Global land-based datasets for monitoring climatic extremes**. *Bulletin of American Meteorological Society*, 94, s. 997–1006. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00109.1.
- Dudok de Wit, T., Kopp, G., Fröhlich, C., Schöll, M. (2017). **Methodology to create a new total solar irradiance record: Making a composite out of multiple data records**. *Geophysical Research Letters*, 44(3), s. 1196–1203. DOI: 10.1002/2016GL071866.
- EPA (2016). **Climate Change Indicators: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases**, <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>, (dostęp: 06.03.2019).
- Feldman, D., Collins, W., Gero, P., Torn, M.S., Mlawer, E.J., Shippert, T.R. (2015). **Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010**. *Nature*, 519, s. 339–343. DOI: 10.1038/nature14240.
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D.C.E., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L.P., Currie, K.I., Feely, R.A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D.S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R.A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A.K., Joetzjer E., Kaplan, J.O., Kato, E., Klein Goldewijk, K., Korsbakken, J.I., Landschützer, P., Lauvset, S.K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Metzl, N., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., Neill, C. Omar, A.M., Ono, T., Peregón, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F.N., van der Werf, G.R., Wiltshire, A.J., Zaehle, S. (2019). **Global Carbon Budget 2019**. *Earth System Science Data*, 11, s1783–1838. DOI: 10.5194/essd-11-1783-2019.
- Gerlach, T. (2011) **Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide**. *EOS*, 92(24), s. 201–202. DOI: 10.1029/2011EO240001.
- Global Carbon Project (2019). **Global Carbon Budget 2019**. Pobrane z: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm> (dostęp: 16.01.2020).
- Harries, J., Brindley, H., Sagoo, P., Bantges, R.J. (2001). **Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997**. *Nature*, 410, s. 355–357. DOI: <https://doi.org/10.1038/35066553>.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M. (2013). **Observations: Atmosphere and Surface**. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania, Nowy Jork, USA: Cambridge University Press.
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, USA: Cambridge University Press.
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., Verchot, L. (2019) **Land–climate interactions**. W: Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (red.) **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/05_Chapter-2.pdf, (dostęp: 24.02.2020).
- Keeling, C., Bacastow, R., Bainbridge, A., Ekdahl, C., Guenther, P., Waterman, L., Chin, J. (1976). **Atmospheric Carbon-Dioxide Variations at Mauna-Loa Observatory**, Hawaii. *Tellus*, 28, 538–551.
- Kopp, G., Lean, J.L. (2011). **A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance**. *Geophysical Research Letters*,



BIBLIOGRAFIA

38(1), L01706-1 – L01706-7. DOI: 10.1029/2010GL045777.

Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Baranova, O.K., Garcia, H.E., Locarnini, R.A., Mishonov, A.V., Reagan J.R., Seidov, D., Yarosh, E.S., Zweng, M.M. (2012). **World ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m), 1955–2010**. *Geophysical Research Letters*, 39(10), s. L10603-1 – L10603-5. DOI:10.1029/2012GL051106.

Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., Ni, F. (2009). **Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly**. *Science*, 326, s. 1256-1260. DOI: 10.1126/science.1177303.

Manning, A.C., Keeling, R.F. (2006). **Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network**. *Tellus B*, 58, s. 95–116.

Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J.F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X., Timmermann, A. (2013) *Information from Paleoclimate Archives*. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork USA: Cambridge University Press.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). **Nauka o klimacie**. Warszawa: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum i Wydawnictwo Nieoczywiste.

Popkiewicz, M. (2013). **Mit: Dwutlenek węgla emitowany przez człowieka nie ma znaczenia**. <https://naukaoklimacie.pl/fakty-i-mity/mit-dwutlenek-węgla-emitowany-przez-czlowieka-nie-ma-znaczenia-31?t=2>. (dostęp: 24.02.2020).

Ramaswamy, V., Chanin, M. L., Angell, J., Barnett, J., Gaffen, D., Gelman, M., Keckhut, P., Koshelkov, Y., Labitzke, K., Lin, J. J. R., O'Neill, A., Nash, J., Randel, W., Rood, R., Shine, K., Shiotani, M., Swinbank, R. (2001). **Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations**. *Reviews of Geophysics*, 39 (1), s. 71-222. DOI: 10.1029/1999RG000065.

Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Randel, W. J., Santer, B. D., Soden, B. J., Stenchikov, G. L. (2006). **Anthropogenic and Natural Influences in the Evolution of Lower Stratospheric Cooling**. *Science*, 311 (5764), s. 1138-1141. DOI: 10.1126/science.1122587.

Shakun, J., Clark, P., He, F., Marcott, S.A., Mix, A.C., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A., Bard, E. (2012). **Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation**. *Nature* 484, s. 49–54. DOI: 10.1038/nature10915.

Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.S., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J. (red.) (2019). **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. <https://www.ipcc.ch/srcc/> (dostęp: 24.02.2020).

Tyndall, J. (1872). **Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat**. Londyn, Wielka Brytania: Longmans, Green, and co.

World Meteorological Organization (2017). **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016**. WMO Greenhouse gas bulletin, 13, s. 1–8. Pobrane z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022 (dostęp: 20.02.2020).

World Meteorological Organization (2018). **The State of Greenhouse**

Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2017. WMO Greenhouse gas bulletin, 14, s. 1–8. Pobrane z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5455 (dostęp: 20.02.2020).

World Meteorological Organization (2019). **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018**. WMO Greenhouse gas bulletin, 15, s. 1–8. Pobrane z: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620 (dostęp: 18.01.2020).

Wu, C.-J., Krivova, N. A., Solanki, S.K., Usoskin, I.G. (2018). **Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years**. *Astrophysics*, 620, A120-1 – A120-12. DOI: 10.1051/0004-6361/201832956.

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R.B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneeth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T.A.M., Stocker, B.D., Viovy, B., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S., Zeng, N. (2016). **Greening of the Earth and its drivers**. *Nature Climate Change* 6, s. 791–795. DOI: 10.1038/nclimate3004.

LEKCJA 7

Allgaier, J. (2019). **Science and Environmental Communication on YouTube: Strategically Distorted Communications in Online Videos on Climate Change and Climate Engineering**. *Frontiers in Communication*, 4, 36. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2019.00036>.

Anderegg, W. R. L., Prall, J. W., Harold, J., & Schneider, S. H. (2009). **Expert credibility in climate change**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 12107-12109. doi: 10.1073/pnas.1003187107.

Cohen, S. (2001). **States of denial: Knowing about atrocities and suffering**. Cambridge: Polity Press.

Dunlap, R. E. (2013). **Climate change skepticism and denial: An introduction**. *American Behavioral Scientist*, 57, 691-698. doi: 10.1177/0002764213477097

Dunlap, R. E., & McCright, A. M. (2010). **Climate change denial: Sources, actors and strategies**. w Lever-Tracy C. (Ed.), *Routledge handbook of climate change and society* (s. 240-259). Abingdon: Routledge.

Dunlap, R. E., & McCright, A. M. (2011). **Organized climate change denial**. W Dryzek, J. S., Norgaard, R. B., & Schlosberg, D. (Eds.), *The Oxford handbook of climate change and society*, s. 144-160. Oxford: Oxford University Press.

European Social Survey ERIC (ESS ERIC). (2016). **European Social Survey (ESS)**, Cumulative Data Wizard. <https://doi.org/10.21338/nsd-ess-cumulative>.

Feliksiak, M. (2016). **Stan środowiska i zmiany klimatu** (39/2016). CBOS. http://www.cbos.pl/SPISKOM.POL/2016/K_039_16.PDF.

Gifford, R. (2011). **The dragons of inaction: Psychological barriers that limit climate change mitigation and adaptation**. *American Psychologist*, 66, 290-302.

Guagnano, G. A., Stern, P. C., & Dietz, T. (1995). **Influences on attitude-behavior relationships: A natural experiment with curbside recycling**. *Environment and Behavior*, 27, 699-718.

Gwiazda, M. (2016). **Polacy o przyszłości energetycznej kraju** (28/2016). Fundacja Centrum Badania Opinii Społecznej.

Gwiazda, M., & Kolbowska, A. (2009). **Polacy o zmianach klimatu** (14/2009). Fundacja Centrum Badania Opinii Społecznej.



BIBLIOGRAFIA

- Hall, M. P., Lewis Jr, N. A., & Ellsworth, P. C. (2018). **Believing in climate change, but not behaving sustainably: Evidence from a one-year longitudinal study.** *Journal of Environmental Psychology*, 56, 55-62.
- Heald, S. (2017). **Climate Silence, Moral Disengagement, and Self-Efficacy: How Albert Bandura's Theories Inform Our Climate-Change Predicament.** *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 59(6), 4-15. <https://doi.org/10.1080/00139157.2017.1374792>
- Hobson, K., & Niemeyer, S. (2012). **"What sceptics believe": The effects of information and deliberation on climate change scepticism.** *Public Understanding of Science*, 22, 396-412. doi: 10.1177/0963662511430459.
- Horner, C. C. (2008). **Red hot lies: How global warming alarmists use threats, fraud, and deception to keep you misinformed.** Washington, DC: Regnery.
- Kantar Polska. (2019). **Ziemia nie atakuje!** Kantar. <https://ziemia nie atakuje.pl/>.
- Kundzewicz, Z. W. (2013). **Cieplejszy świat. Rzecz o zmianach klimatu.** Wydawnictwo Naukowe PWN: Warszawa.
- Lewandowsky, S., Cook, J., Oberauer, K., Brophy, S., Lloyd, E. A., & Marriott, M. (2015). **Recurrent fury: Conspiratorial discourse in the blogosphere triggered by research on the role of conspiracist ideation in climate denial.** *Journal of Social and Political Psychology*, 3(1), 142-178. <https://doi.org/10.5964/jssp.v3i1.443>
- Lindzen, R. S. (2008, August). **Climate science: Is it currently designed to answer questions?** Paper presented at the Creativity and Creative Inspiration in Mathematics, Science, and Engineering Conference, San Marino, Italy.
- McCright, A. M. (2016). **Anti-reflexivity and climate change skepticism in the US general public.** *Human Ecology Review*, 22, 77-108.
- National Center for Science Education (2016). **Why is it called denial?** Retrieved from <https://ncse.ngo/why-it-called-denial>
- Norgaard, K. M. (2006). **"People want to protect themselves a little bit": Emotions, denial, and social movement nonparticipation.** *Sociological Inquiry*, 76, 372-396. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-682X.2006.00160.x>.
- Oreskes, N., & Conway, E. M. (2010). **Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming.** Bloomsbury Press.
- Pew Research Center. (2019). **Climate Change Still Seen as the Top Global Threat, but Cyberattacks a Rising Concern** (202.419.4372). https://www.pewresearch.org/global/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/Pew-Research-Center_Global-Threats-2018-Report_2019-02-10.pdf
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2019). **World scientists' warning of a climate emergency.** *BioScience*, 70, 8-12.
- Roguska, B. (2014). **Opinie o bezpieczeństwie narodowym** (18/2014). CBOS.
- Schultz, P. W., Nolan, J. M., Cialdini, R. B., Goldstein, N. J., & Griskevicius, V. (2007). **The constructive, destructive, and reconstructive power of social norms.** *Psychological Science*, 18, 429-434.
- Stern, P. C. (2012). **Psychology: Fear and hope in climate messages.** *Nature Clim. Change*, 2(8), 572-573. <https://doi.org/10.1038/nclimate1610>
- Stern, P. C. (2000a). **Toward a coherent theory of environmentally significant behavior.** *Journal of Social Issues*, 56, 407-424.
- Stern, P. C. (2000b). **Psychology, sustainability, and the science of human-environment interactions.** *American Psychologist*, 55, 523-530.
- Stern, P. C., & Gardner, G. T. (1981). **The place of behavior change in managing environmental problems.** *Zeitschrift für Umweltpolitik*, 2, 213-239.
- Swim, J., Clayton, S., Doherty, T., Gifford, R., Howard, G., Reser, J., ... & Weber, E. (2009). **Psychology and global climate change: Addressing a multi-faceted phenomenon and set of challenges. A report by the American Psychological Association's task force on the interface between psychology and global climate change.** Washington, DC: American Psychological Association.
- Weart, S. (2011). **Global warming: How skepticism became denial.** *Bulletin of the Atomic Scientists*, 67, 41-50. doi: 10.1177/0096340210392966.
- Wójcik, A., & Byrka, K. (2016). **Jak promować politykę prośrodowiskową i energetykę odnawialną w Polsce.** WWF Polska.

LEKCJA 8

- Farman, J., Gardiner, B. & Shanklin, J. (1985). **Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction.** *Nature* 315, 207-210 <https://doi.org/10.1038/315207a0>
- Johnston, H. S. (1971). **Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust.** *Science*, 173, 517-522.
- Maxwell, J., Briscoe, F. (1997). **There's money in the air: The CFC ban and DuPont's regulatory strategy.** *Business Strategy and the Environment* 6(5): 27-286.
- Mattauch, L., Cameron, H. (2016). **Climate Policy When Preferences Are Endogenous-and Sometimes They Are.** *Midwest Studies In Philosophy* 40 (1): 76-95.
- Molina, M.J., Rowland F.S. (1974). **Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone.** *Nature* 249: 810-812.
- Nordhaus, W. D. (2007). **A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change.** *Journal of Economic Literature*. <https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jel.45.3.686>.
- Nordhaus, . (2019). **Can We Control Carbon Dioxide? (From 1975).** *The American Economic Review* 109 (6): 2015-35.
- Nordhaus, W.D. (1992). **The 'DICE' Model: Background and Structure of a Dynamic Integrated Climate-Economy Model of the Economics of Global Warming.** 1009. Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University. <https://ideas.repec.org/p/cwl/cwldpp/1009.html>.
- Nordhaus, W.D., and James Tobin. 1972. **Is Growth Obsolete?** In *Economic Research: Retrospect and Prospect*, Volume 5, Economic Growth, 1-80. NBER.
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., and Schmidt, A.: **Emergence of healing in the Antarctic ozone layer.** *Science*, 353, 269-274, doi:10.1126/science.aae0061, 2016.
- Stern, N.H., Peters, S., Bakhshi, V., Bowen, A., Cameron C., Catovsky S., Crane D., et al. (2006). **Stern Review: The Economics of Climate Change.** Vol. 30. Cambridge University Press Cambridge. <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20838308>.
- Żylicz, T., (2016). **Międzynarodowa współpraca ekologiczna**, wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok.



BIBLIOGRAFIA

LEKCJA 9

Djaków, P. (2019). **Polskie lato 2019 - dziś rekordowo gorące, w przyszłości typowe lub wręcz chłodne?** Pobrane z: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/polskie-lato-2019-dzis-rekordowo-gorace-w-przyszlosci-typowe-lub-wrecz-chlodne-387> (dostęp: 31.03.2020).

Djaków, P. (2020). **Najcieplejszy rok w polskiej historii pomiarów. Ponownie.** Pobrane z: <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/najcieplejszy-rok-w-polskiej-historii-pomiarow-ponownie-396> (dostęp: 01.04.2020).

Fasullo, J.T., Boening, C., Landerer, F.W., Nerem, R.S. (2013). **Australia's unique influence on globalsea level in 2010–2011.** *Geophysical Research Letters*, 40, s. 4368-4373. DOI: 10.1002/grl.50834.

Global Carbon Project (2016). Pobrane z: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive.htm> (dostęp: 16.03.2020).

Hansen, J., Sato, M. (2016). Pobrane z: <http://www.columbia.edu/~mh119/PerceptionsAndDice/>. (dostęp: 25.03.2020).

Hov, Ø., Cubasch, U., Fischer, E., Hölpe, P., Iversen, T., Kvamstø, N.G., Kundzewicz, Z.W., Rezacova, D., Rios, D., Santos, F.D., Schädler, B., Veisz, O., Zerefos, C., Benestad, R., Murlis, J., Donat, M., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U. (2013). **Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation.** Cambridge, Wielka Brytania: Banson. Pobrane z: https://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Extreme_Weather/Extreme_Weather_full_version_EASAC-EWWG_final_low_resolution_Oct_2013f.pdf (dostęp: 31.03.2020).

IMGW (2017a). **Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, zima 2016/2017.** Pobrane z: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (dostęp: 08.03.2019).

IMGW (2017b). **Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, wiosna 2017.** Pobrane z: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (dostęp: 08.03.2019).

IMGW (2017c). **Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, lato 2017.** Pobrane z: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (dostęp: 08.03.2019).

IMGW (2017d). **Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, jesień 2017.** Pobrane z: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (dostęp: 08.03.2019).

IMGW (2019). **Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, rok 2018.** Pobrane z: <http://klimat.pogodynka.pl/pl/biuletyn-monitoring/> (dostęp: 08.03.2019).

IPCC (2018). **Summary for Policymakers.** W: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T. (red.) **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** Pobrane z: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp 06.02.2020).

IPCC (2013). **Summary for Policymakers.** W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, USA: Cambridge University Press.

Klimada (2020). Pobrane z: <http://klimada.mos.gov.pl/zmiany-klimatu-w-polsce/tendencje-zmian-klimatu/> (dostęp: 02.04.2020).

Kopp, R.E., Kemp, A.C., Bittermann, K., Horton, B.P., Donnelly, J.P., Gehrels, W.R., Hay, C.C., Mitrovica, J.X., Morrow, E.D., Rahmstorf, S. (2016). **Common Era global sea-level variability.**

Kopp, R.E., Kemp, A.C., Bittermann, K., Horton, B.P., Donnelly, J.P., Gehrels, W.R., Hay, C.C., Mitrovica, J.X., Morrow, E.D., Rahmstorf, S. (2016). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 113 (11), s. E1434-E1441. DOI: 10.1073/pnas.1517056113.

Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., MohapatraIndia, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L. (2019a). **Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part I: Detection and Attribution.** *Bulletin of American Meteorological Society*, 101, s.1987-2007. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0189.1.

Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., MohapatraIndia, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., Wu, L. (2019b). **Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming.** *Bulletin of American Meteorological Society*, 101, s.E303-E322. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0194.1.

Kossin, J., Emanuel, K., Vecchi, G. (2014). **The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity.** *Nature* 509, s. 349–352. DOI: 10.1038/nature13278.

Kossin, J.P. (2018). **A global slowdown of tropical-cyclone translation speed.** *Nature*, 558, s.104-107. DOI: 10.1038/s41586-018-0158-3.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T. (red.) (2018). **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.** Pobrane z: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K.V., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A.K., Velders G.J.M., van Vuuren D. (2011). **The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extension from 1765 to 2300.** *Climatic Change* (Special Issue), 109, s. 213-240. DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.

Mann, M.E., Rahmstorf, S., Kornhuber, K., Steinman, B.A., Miller, S.K., Petri, S., Coumou, D. (2018). **Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification.** *Science Advances*, 4, s. eaat3272-1 – eaat3272-9. DOI: 10.1126/sciadv.aat3272.

Nakicenovic, N., Swart, R., (red.) (2000). **Emission Scenarios.** Cambridge, Wielka Brytania: Cambridge University Press.

NASA (2020). **Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. Land Ice.** Pobrane z: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/> (dostęp 07.04.2020).

Norris, J.R., Allen, R.J., Evan, A.T., Zelinka, M.D., O'Dell, C.W., Klein, S.A. (2016). **Evidence for climate change in the satellite cloud record.** *Nature* 536, s. 72–75. DOI: 10.1038/nature18273.

NSIDC (2020). **Quick Facts on Arctic Sea Ice.** Pobrane z: <https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/seaice.html> (dostęp: 07.04.2020).

New York Times (2017). Pobrane z: <https://www.nytimes.com/interactive/2017/07/28/climate/more-frequent-extreme-summer-heat.html> (dostęp: 25.03.2020).



BIBLIOGRAFIA

Ostrowski, J., Czarnecka, H., Głowacka, B., Krupa-Marchlewska, J., Zaniewska, M., Sasim, M., Moskwiński, T., Dobrowolski, A. (2012). **Nagłe powodzie lokalne (flash flood) w Polsce i skala ich zagrożeń**. W: Lorenc, H. (red.). *Kłęski żywiołowe a niebezpieczeństwo wewnętrzne kraju*. Warszawa: IMGW-PIB.

Perkins-Kirkpatrick, S.E., Gibson, P.B. (2017). **Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature**. *Scientific Reports* 7, s. 12256-1 - 12256-12. DOI: 10.1038/s41598-017-12520-2.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). **Nauka o klimacie**. Warszawa: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum i Wydawnictwo Nieoczywiste.

Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer N.M. (red.) (2019). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Pobrane z: <https://www.ipcc.ch/srocc/> (dostęp: 07.04.2020).

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelmann, R., Schellnhuber, H.J. (2018). **Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the National Academy of Sciences**, 115(33), s. 8252-8259. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L.V., Allen, S.K., Bindoff, N.L., Bréon, F.-M., Church, J.A., Cubasch, U., Emori, S., Forster, P., Friedlingstein, P., Gillett, N., Gregory, J.M., Hartmann, D.L., Jansen, E., Kirtman, B., Knutti, R., Krishna Kumar, K., Lemke, P., Marotzke, J., Masson-Delmotte, V., Meehl, G.A., Mokhov, I.I., Piao, S., Ramaswamy, V., Randall, D., Rhein, M., Rojas, M., Sabine, C., Shindell, D., Talley, L.D., Vaughan, D.G., Xie, S.-P. (2013). **Technical Summary**. W: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania i Nowy Jork, USA: Cambridge University Press.

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (red.) (2013). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Wielka Brytania, Nowy Jork, USA: Cambridge University Press.

Szwed, M. (2019). **Variability of precipitation in Poland under climate change, Theoretical and Applied Climatology**, 135, s. 1003–1015. DOI: 10.1007/s00704-018-2408-6.

Szwed, M., Graczyk, D., Pińskwar, I., Kundzewicz, Z.W. (2007). **Projections of climate extremes in Poland**. *Geographica Polonica*, 80, s. 191–197.

Trenberth, K.E. (2011). **Changes in precipitation with climate change. Climate Research**, 47, s. 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.

Walsh, J.I., Fetterer, F., Stewart J.S., Chapman W.L. (2017). **A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850**. *Geographical Review*, 107:1, s. 89–107. DOI: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.

WGMS (2020). Pobrane z: <https://wgms.ch/> (dostęp: 07.04.2020).

World Meteorological Organization (2020). **WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019**. Pobrane z: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10211 (dostęp: 31.03.2020).

van Oldenborgh, G.J., van der Wiel, K., Sebastian, A., Singh, R., Arrighi,

J., Otto, F., Haustein, K., Li, S., Vecchi, G., Cullen, H. (2017) **Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017**. *Environmental Research Letters*, 12, 124009-1 – 124009-11. DOI: 10.1088/1748-9326/aa9ef2.

LEKCJA 10

Bailey, R., Copeland, O. (1961). **Low flow discharges and plant cover relations on two mountain watersheds in Utah**. *Inter. Assoc. of Science Hydro Pub.* 51: 267–278.

Barnosky, A.D., Koch, P.L., Feranec, R.S., Wing, S.L., Shabel, A.B. (2004). **Assessing the causes of late Pleistocene extinctions on the continents**. *Science* 306: 70–75.

Estes, J.A., Tinker, M.T., Williams, T.M., Doak, D.F. (1998). **Killer Whale Predation on Sea Otters Linking Oceanic and Nearshore Ecosystems**. *Science* 282: 473–476 (<https://science.sciencemag.org/content/282/5388/473.full>).

Mills, J.G., Brookes, J.D., Gellie, N.J. C., Liddicoat, C., Lowe, A.J., Sydnor, H.R., Thomas, T., Weinstein, P., Weyrich, L.S., Breed, M.F. (2019). **Relating Urban Biodiversity to Human Health With the 'Holobiont' Concept**. *Front. Microbiol.* 10: 550 (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00550/full>).

Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., (...), Wapstra, E., Williams, S.E. (2017). **Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being**. *Science* 355: 1389.

Perino, A., Pereira, H.M., Navarro, L.M., (...), Svenning, J.-C., Wheeler, H.C. (2019). **Rewilding complex ecosystems**. *Science* 364: 351 (<https://science.sciencemag.org/content/sci/364/6438/eaav5570.full.pdf>).

Rosenberg, K.V., Dokter, A.M., Blancher, P.J., (...), Parr, M., Marra, P.P. (2019). **Decline of the North American avifauna**. *Science* 366: 120–124.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., (...), Wöllauer, S., Weisser, W.W. (2019). **Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers**. *Nature* 574: 671–674.

Szpak, P., Trevor, J.O., Salomon, A.K., Gröcke, D.R. (2013). **Regional ecological variability and impact of the maritime fur trade on nearshore ecosystems in southern Haida Gwaii (British Columbia, Canada): evidence from stable isotope analysis of rockfish (*Sebastes* spp.) bone collagen**. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 5: 159–182.

Wilmers, C.C., Estes, J.A., Edwards, M., Laidre, K.L., Konar, B. (2012). **Do trophic cascades affect the storage and flux of atmospheric carbon? An analysis of sea otters and kelp forests**. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10: 409–415 (<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1890/110176>).

LEKCJA 11

Bailey, R., Copeland, O. (1961). **Low flow discharges and plant cover relations on two mountain watersheds in Utah**. *Inter. Assoc. of Science Hydro Pub.* 51: 267–278.

Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., ... & Crowther, T. W. (2019). **The global tree restoration potential**. *Science*, 365(6448), 76–79.

Barnosky, A.D., Koch, P.L., Feranec, R.S., Wing, S.L., Shabel, A.B. (2004). **Assessing the causes of late Pleistocene extinctions on the continents**. *Science* 306: 70–75.

Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P., Scholes, J.D., Ton, J., Nelson, P.N., Bird, M., Kantzas, E., Taylor, L.L., Sarkar, B., Kelland, M., DeLucia, E., Kantola, I., Müller, C., Rau, G., Hansen, J. (2018). **Farming with crops and**



BIBLIOGRAFIA

rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants* 4, s. 138–147. DOI: 10.1038/s41477-018-0108-y.

Estes, J.A., Tinker, M.T., Williams, T.M., Doak, D.F. (1998). **Killer Whale Predation on Sea Otters Linking Oceanic and Nearshore Ecosystems.** *Science* 282: 473-476 (<https://science.sciencemag.org/content/282/5388/473.full>).

Friedlingstein, P., Jones, M., O'Sullivan, M., Andrew, R., Hauck, J., Peters, G., ... & DBakker, O. (2019). **Global carbon budget 2019.** *Earth System Science Data*, 11(4), 1783-1838.

IPCC (2019). Summary for Policymakers. W: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems** [Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].

Mills, J.G., Brookes, J.D., Gellie, N.J. C., Liddicoat, C., Lowe, A.J., Sydnor, H.R., Thomas, T., Weinstein, P., Weyrich, L.S., Breed, M.F. (2019). **Relating Urban Biodiversity to Human Health With the 'Holobiont' Concept.** *Front. Microbiol.* 10: 550, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.00550/full>.

Norris, J.R., Allen, R.J., Evan, A.T., Zelinka, M.D., O'Dell, C.W., Klein, S.A. (2016). **Evidence for climate change in the satellite cloud record.** *Nature* 536, s. 72–75. DOI: 10.1038/nature18273.

Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2002). **The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997.** *Nature*, 420(6911), 61-65.

Parish, F. A. I. Z. A. L., Sirin, A. A., Charman, D., Joosten, H. A. N. S., Minaeva, T. Y., & Silvius, M. A. R. C. E. L. (2008). **Assessment on peatlands, biodiversity and climate change.**

Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., (...), Wapstra, E., Williams, S.E. (2017). **Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being.** *Science* 355: 1389.

Perino, A., Pereira, H.M., Navarro, L.M., (...), Svenning, J.-C., Wheeler, H.C. (2019). **Rewilding complex ecosystems.** *Science* 364: 351 (<https://science.sciencemag.org/content/sci/364/6438/eaav5570.full.pdf>).

Rosenberg, K.V., Dokter, A.M., Blancher, P.J., (...), Parr, M., Marra, P.P. (2019). **Decline of the North American avifauna.** *Science* 366: 120-124.

Schneider, T., Kaul, C. M., & Pressel, K. G. (2019). **Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming.** *Nature Geoscience*, 12(3), 163.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., (...), Wöllauer, S., Weisser, W.W. (2019). **Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers.** *Nature* 574: 671–674.

Szpak, P., Trevor, J.O., Salomon, A.K, Gröcke, D.R. (2013). **Regional ecological variability and impact of the maritime fur trade on nearshore ecosystems in southern Haida Gwaii (British Columbia, Canada): evidence from stable isotope analysis of rockfish (*Sebastes* spp.) bone collagen.** *Archaeol. Anthropol. Sci.* 5: 159–182.

Wilmers, C.C., Estes, J.A., Edwards, M., Laidre, K.L. Konar, B. (2012). **Do trophic cascades affect the storage and flux of atmospheric carbon? An analysis of sea otters and kelp forests.** *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10: 409-415 (<https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1890/110176>).

LEKCJA 12

Australian Psychological Society. (2019). **Coping with Climate Change Distress**, Information Sheet. <https://www.psychology.org.au/for-the-public/Psychology-topics/Climate-change-psychology/Coping-with-climate-change-distress>. (dostęp: 15.12.2019).

Albrecht, G., Sartore, G. M., Connor, L., Higginbotham, N., Freeman, S., Kelly, B., ... & Pollard, G. (2007). **Solastalgia: the distress caused by environmental change.** *Australasian psychiatry*, 15 (sup1), s. 95-98.

Alston, P. (2019). **Climate change and poverty: report of the Special Rapporteur on Extreme Poverty and Human Rights.** Dostępne: wirtualna biblioteka ONZ: <https://digitallibrary.un.org/record/3810720>.

Butler, J. (2004). **Precarious Life: The Powers of Mourning and Violence.** Verso: New York.

Clayton, S., Manning, C. M. & Hodge, C. (2014). **Beyond Storms and Droughts: The Psychological Impacts of Climate Change.** Washington, DC: American Psychological Association, ecoAmerica.

Clayton, S., Manning, C., Krygman, K., & Speiser, M. (2017). **Mental health and our changing climate: impacts, implications, and guidance.** Washington, DC: American Psychological Association and ecoAmerica.

Ceballos, G., Ehrlich, P. R. & Dirzo, R. (2017). **Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines.** *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 114, E6089–E6096.

Cunsolo, A., & Ellis, N. R. (2018). **Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss.** *Nature Climate Change*, 8(4), 27–281.

Doherty, T. J., & Clayton, S. (2011). **The Psychological Impacts of Global Climate Change.** *American Psychologist*, 66(4), 265–276.

Doka, K. J. (1989). **Disenfranchised grief: Recognizing hidden sorrow.** Lexington: Lexington Books/DC Heath and Com.

Gifford, R. (2011). **The dragons of inaction: Psychological barriers that limit climate change mitigation and adaptation.** *American psychologist*, 66(4), 290.

Gorman, S. E., Gorman, J.M. (2017). **Denying to the Grave: Why We Ignore the Facts That Will Save Us.** New York: Oxford Press.

Havel, V. (1990). **Disturbing the peace: a conversation with Karel Hviždala.** New York: Knopf.

Head, L. (2016). **Hope and Grief in the Anthropocene: Re-conceptualizing human–nature relations.** London/New York: Routledge.

Horwitz, A. V., & Wakefield, J. C. (2007). **The loss of sadness: How psychiatry transformed normal sorrow into depressive disorder.** Oxford University Press.

Kaplan, S. & Berman, M.G. (2010). **Directed Attention as a Common Resource for Executive Functioning and Self-Regulation.** *Perspectives on Psychological Science*, 5, 1, 43-57.

Lewis J. **In the room with climate anxiety, part 1.** *Psychiatric Times*. 2018; 35(11):1-2. Dostępne: <https://www.psychiatrictimes.com/climate-change/room-climate-anxiety>.

Norgaard, K. M. (2011). **Living in denial: Climate change, emotions, and everyday life.** Cambridge/London: MIT Press.

Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., & Moomaw, W. R. (2019). **World scientists' warning of a climate emergency.** *BioScience*.

Rockström, J., Steffen, W. L., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., ... & Nykvist, B. (2009). **Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity.** *Ecology and society*.



BIBLIOGRAFIA

- Roszak, T. (1992). **The voice of the earth**. New York: Touchstone.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. & Ludwig, C. (2015). **The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration**. *Anthropocene Rev.* 2, 81–98.
- Scott, B. A., Amel, E. L., Koger, S. M., & Manning, C. M. (2015). **Psychology for sustainability**. London/New York: Routledge.
- Sutton, P. C., Anderson, S. J., Costanza, R. & Kubiszewski, I. (2016). **The ecological economics of land degradation: impacts on ecosystem service values**. *Ecol. Econ.* 129, 182–192.
- Taylor, S.E. (2011). "Social support: A Review". In M.S. Friedman. **The Handbook of Health Psychology**. New York, NY: Oxford University Press, 189–214.
- Uscinski, J. E., Douglas, K., & Lewandowsky, S. (2017). **Climate change conspiracy theories**. W: Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Dostępne: <https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-328>.
- van Vugt, M., Griskevicius, V., & Schultz, P. W. (2014). **Naturally green: Harnessing stone age psychological biases to foster environmental behavior**. *Social Issues and Policy Review*, 8, 1–32. <https://doi.org/10.1111/sipr.12000>.
- Verplanken, B., & Roy, D. (2013). **"My worries are rational, climate change is not": habitual ecological worrying is an adaptive response**. *PLoS one*, 8(9), e74708.
- Wilson, E. O. (2017). **Biophilia and the conservation ethic**. In: *Evolutionary perspectives on environmental problems* (pp. 263-272). London/ New York: Routledge.
- World Health Organization. (2018). **COP24 special report: health and climate change**. Dostępne: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/276405/9789241514972-eng.pdf>.
- ## LEKCJA 13
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. W: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T. (red.) **Global Warming of 1,5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. Pobrane z: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).
- Xu, Y., Ramanathan, V., Victor, D.G. (2018). **Global warming will happen faster than we think**. *Nature*, 564, s. 30-32. DOI: 10.1038/d41586-018-07586-5.
- United Nations Environment Programme (2019). Emissions Gap Report 2019. Nairobi, Kenia: UNEP. Pobrane z: <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019> (dostęp: 20.01.2020).
- Anderson, G. i Bell, M. L. (2020, Mar). **Lights out: Impact of the August 2003 power outage on mortality in New York**, NY. *Epidemiology*, 23(2), 189-193. doi:10.1097/EDE.0b013e318245c61c.
- BP. (2019). **BP Statistical Review of World Energy**. Londyn.
- Bundesnetzagentur. (2020). **Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur** – Stand: 01.04.2020. Pobrano 05 02, 2020 z lokalizacji https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2020_1.html.
- Europejska Agencja Środowiska. (2020). **Overview of electricity production and use in Europe**. Pobrano 05 01, 2020 z lokalizacji <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4>.
- Global CCS Institute. (2019). **Global Status of CCS. Targeting Climate Change**. Melbourne. Pobrano z lokalizacji https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf.
- Klimstra, J. i Hotakainen, M. (2011). **Smart Power Generation**. Helsinki: Avain Publishers.
- Komisja Europejska. (2008). **Dokument roboczy służb Komisji – Dokument uzupełniający Wniosek dyrektora Parlamentu europejskiego i Rady w sprawie podziemnego składowania dwutlenku węgla** – Streszczenie oceny skutków {KOM(2008) 18 wersja ostateczna} {SEK(2008) 54} /* SEC/2008/0055 końco. Pobrano z lokalizacji http://publications.europa.eu/resource/cellar/9c0ff0806-1665-4601-bc4a-47e4f0eb46a3.0007.01/DOC_1.
- Marchese, A. J. i Zimmerle, D. (2018, 07 2). **The U.S. natural gas industry is leaking way more methane than previously thought**. Pobrano z lokalizacji The Conversation: <https://theconversation.com/the-us-natural-gas-industry-is-leaking-way-more-methane-than-previously-thought-heres-why-that-matters-98918>.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., ... Waterfield, T. (2018). **Global Warming of 1,5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1,5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change**. IPCC. (pobrano: 02.06.2020) <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2019). **IEA Energy Atlas**. Paryż. Pobrano z lokalizacji <http://energyatlas.iea.org/>.
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2019). **World Energy Balances**. Pobrano 05 01, 2020 z lokalizacji <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>.
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2020). **Data and Statistics**. Pobrano 05 01, 2020 z lokalizacji www.iea.org/data-and-statistics.
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2020). **Power Reactor Information System**. Pobrano maj 2, 2020 z lokalizacji <https://pris.iaea.org/>.
- Ponchet, M. (2007). **Milestones for Nuclear Power Infrastructure Development**. CEA. Pobrano z lokalizacji <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2007/tm33552/day3Ponchet.pdf>.
- PSE S.A. (2020). **Praca KSE – Zapotrzebowanie mocy KSE**. Pobrano 05 02, 2020 z lokalizacji Portal internetowy spółki PSE S.A.: <https://www.pse.pl/obszary-dzialalnosci/krajowy-system-elektroenergetyczny/zapotrzebowanie-kse>.
- Europejska Agencja Środowiska (2019). **Air quality in Europe – 2019 report**. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>.
- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. **Polski indeks jakości powietrza**: <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current>.
- Stacje systemu monitoringu jakości powietrza w Polsce**: <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/measuringstation>.
- Fisk, W. J., Satish U., Mendell, M. J., Hotchi, T., Sullivan, D. (2013). **Is CO₂ an indoor pollutant? Higher levels of CO₂ may diminish decision making performance**. ASHRAE JOURNAL 55.LBNL-6148E.



BIBLIOGRAFIA

- Jacobson, T. A., Kler, J. S., Hernke, M. T., Braun, R. K., Meyer, K. C., Funk, W. E. (2019). **Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide**. *Nature Sustainability* 2.8 (2019): 691-701. <https://www.nature.com/articles/s41893-019-0323-1>.
- Juda-Rezler, K. (red.). (2016). **Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce**. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/publications/card/2054>.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J. D., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. W: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <http://www.climatechange2013.org/report/full-report>.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., Fisk, W. J. (2012). **Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance**. *Environmental health perspectives* 120.12, 1671-1677. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/full/10.1289/ehp.1104789>.
- Vallero, D. A. (2008). **Fundamentals of Air Pollution** (Fourth Edition). Academic Press. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123736154>.
- ### LEKCJA 14
- American Psychological Association (2020). **Majority of US adults believe climate change is most important issue today**. Retrieved from <https://www.apa.org/news/press/releases/2020/02/climate-change>.
- Australian Psychological Society (2019). **Coping with climate change distress**. Retrieved from <https://www.psychology.org.au/for-the-public/Psychology-topics/Climate-change-psychology/Coping-with-climate-change-distress>.
- Bowles, S. (2016). **The moral economy: Why good incentives are no substitute for good citizens**. New Haven, CT: Yale University Press.
- Brechin, S. R., & Bhandari, M. (2011). **Perceptions of climate change worldwide**. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 871-885.
- Chenoweth, E., & Stephan, M. J. (2011). **Why civil resistance works: The strategic logic of nonviolent conflict**. New York, NY: Columbia University Press.
- Chenoweth, E., & Stephan, M. J. (2014). **Drop your weapons: When and why civil resistance works**. *Foreign Affairs*, 93, 94-106.
- Besta, T., Jaśko, K., Grzymała-Moszczyńska, J., & Górka, P. (2019). **Walcz, protestuj, zmieniaj świat: psychologia aktywizmu**. Sopot: Wydawnictwo Smak Słowa.
- Howell, R. A. (2013). **It's not (just) "the environment, stupid!" Values, motivations, and routes to engagement of people adopting lower-carbon lifestyles**. *Global Environmental Change*, 23, 281-290.
- Goldberg, M. H., van der Linden, S., Maibach, E., & Leiserowitz, A. (2019). **Discussing global warming leads to greater acceptance of climate science**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 14804-14805.
- Johansson Sevä, I., & Kulin, J. (2018). **A Little More Action, Please: Increasing the Understanding about Citizens' Lack of Commitment to Protecting the Environment in Different National Contexts**. *International Journal of Sociology*, 48(4), 314-339.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H.J. (2018). **Trajectories of the earth system in the anthropocene**. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 8252-8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115
- Stern, P. C. (2000). **New environmental theories: toward a coherent theory of environmentally significant behavior**. *Journal of social issues*, 56(3), 407-424.
- Werfel, S. H. (2017). **Household behavior crowds out support for climate change policy when sufficient progress is perceived**. *Nature Climate Change*, 7(7), 512-515.
- Searchinger, T. D., Wiersma, S., Beringer, T., & Dumas, P. (2018). **Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change**. *Nature*, 564(7735), 249-253.
- Wilson, E. O. (2016). **Half-earth: our planet's fight for life**. WW Norton & Company.
- Roque, B. M., Brooke, C. G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L. J., Najafi, N., ... & Elor-Fadros, E. (2019). **Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assembly**. *Animal Microbiome*, 1(1), 3.
- Society for Ecological Restoration International. 2004. **The SER International Primer on Ecological Restoration**. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International.
- Szwagrzyk, J., Gazda, A., Dobrowolska, D., Chećko, E., Zaremba, J., & Tomski, A. (2018). **Natural regeneration following wind disturbance increases the diversity of managed lowland forests in NE Poland**. *Journal of Vegetation Science*, 29(5), 898-906.
- Jabłońska, E., Wiśniewska, M., Marcinkowski, P., Grygoruk, M., Walton, C. R., Zak, D., Wyszomirski, T., Kotowski, W. (2020). **Catchment-scale analysis reveals high cost-effectiveness of wetland buffer zones as a remedy to non-point nutrient pollution in north-eastern Poland**. *Water*, 12(3), 629.
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. W: Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M., Malley, J., (red.). **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. <https://www.ipcc.ch/srccl/>. (dostęp: 19.05.2020)

