

NOWE WYDANIE

Interdyscyplinarne podstawy współczesnej wiedzy o zmianie klimatu

KLIMA TYCZNE ABC

REDAKCJA NAUKOWA

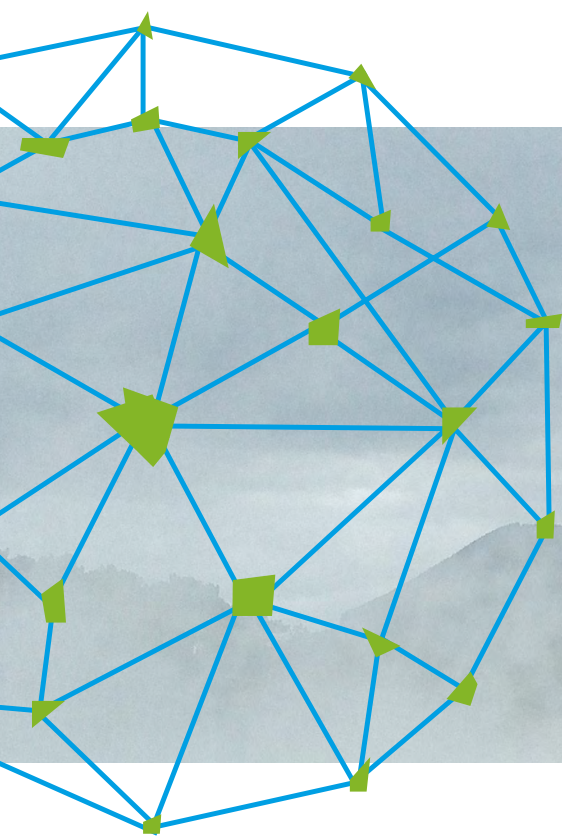
Magdalena Budziszewska
Aleksandra Kardaś
Zbigniew Bohdanowicz



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI



KLIMATYCZNE ABC



KLIMATYCZNE ABC

Interdyscyplinarne podstawy
współczesnej wiedzy o zmianie klimatu

REDAKCJA NAUKOWA

Magdalena Budziszewska
Aleksandra Kardaś
Zbigniew Bohdanowicz



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

RECENZENCI

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

REDAKTOR PROWADZĄCY

Małgorzata Yamazaki

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I KOREKTA

Małgorzata Yamazaki, Elżbieta Szewdo

PROJEKT GRAFICZNY OKŁADKI I WNĘTRZA KSIĄŻKI, OPRACOWANIE ILUSTRACJI

Anna Zagrajek
www.zagrajekania.myportfolio.com

SKŁAD I ŁAMANIE

Anna Zagrajek, Yuliia Negrych

Publikacja dofinansowana przez Uniwersytet Warszawski

Niniejsza publikacja jest chroniona licencją CC BY-SA 4.0

Pełen tekst licencji jest dostępny pod adresem:
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.pl>

Magdalena Budziszewska
ORCID 0000-0002-1837-2086, Uniwersytet Warszawski

Aleksandra Kardaś
ORCID 0000-0002-8257-9997

Zbigniew Bohdanowicz
ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

ISBN 978-83-235-5924-5 (druk)
ISBN 978-83-235-5932-0 (pdf online)

Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego
02-678 Warszawa, ul. Smyczkowa 5/7
e-mail: wuw@uw.edu.pl
księgarnia internetowa: www.wuw.pl

Wydanie 2 zmienione, Warszawa 2023

DRUK I OPRAWA

POZKAL

Wydrukowano na papierze ekologicznym



Wszystkie rozdziały znajdziesz na stronie

klimatyczneabc.uw.edu.pl



www.uw.edu.pl

Więcej informacji o zespole „Uniwersytet Warszawski dla klimatu” znajdziesz na stronie www.uw.edu.pl/universytet/uw-dla-klimatu/

Ilustracja na okładce pokazuje zmiany globalnej średniej temperatury powierzchni Ziemi w latach 1850–2022. Każdy pasek oznacza rok, paski niebieskie to lata ze średnią temperaturą poniżej, a czerwone powyżej średniej z lat 1971–2022. Kolor granatowy symbolizuje lata najchłodniejsze, a kolory ciemnoczerwony lub brązowy – najcieplejsze. Czytamy od lewej do prawej.

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

SPIS TREŚCI

WSTĘP 8

STRUKTURA PODRĘCZNIKA 12

AUTORZY 17

PODZIĘKOWANIA 21

I. PODSTAWOWE MECHANIZMY

1. Od czego zależy temperatura powierzchni Ziemi? 22

Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski

1.1. Jak działa efekt cieplarniany? 23

Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski

1.2. Co się dzieje, gdy zaburzamy bilans energetyczny atmosfery? 26

Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski

1.3. Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym Ziemi 30

Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski

1.4. Punkty krytyczne w systemie klimatycznym Ziemi 34

Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski

2. Jak węgiel krąży w przyrodzie? 38

Aleksandra Kardaś

2.1. Węgiel na Ziemi 39

Aleksandra Kardaś

2.2. Wolny cykl węglowy i termostat węglowy 42

Aleksandra Kardaś

2.3. Węgiel w oceanach 47

Aleksandra Kardaś

2.4. Węgiel w ekosystemach lądowych 51

Aleksandra Kardaś

2.5. Impuls węglowy i jego usuwanie z atmosfery 55

Aleksandra Kardaś

II. PRZYCZYNY

3. Skąd się biorą antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych? 58

Aleksandra Kardaś

3.1. Antropogeniczne emisje dwutlenku węgla 59

Aleksandra Kardaś

3.2. Antropogeniczne emisje innych gazów cieplarnianych 64

Aleksandra Kardaś

3.3. Emisje gazów cieplarnianych z różnych sektorów gospodarki 69

Aleksandra Kardaś

3.4. Emisje gazów cieplarnianych a klimat 74

Aleksandra Kardaś

4. Dlaczego emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną?	76
Tomasz Żylicz, Jan Witajewski-Baltvilks, Zbigniew Bohdanowicz	
4.1. Klimat jako dobro publiczne	77
Tomasz Żylicz, Zbigniew Bohdanowicz	
4.2. Tożsamość Kaya – źródła wzrostu emisji	82
Jan Witajewski-Baltvilks	
5. Fakty i mity o zmianie klimatu	87
Magdalena Budziszewska, Aleksandra Kardaś, Aleksandra Świdarska	
5.1. Skąd wiemy, że to wzrost koncentracji gazów cieplarnianych doprowadził do ocieplenia klimatu?	88
Aleksandra Kardaś	
5.2. Skąd wiemy, że to działalność człowieka doprowadziła do wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze?	93
Aleksandra Kardaś	
5.3. Mity klimatyczne	97
Magdalena Budziszewska, Aleksandra Kardaś, Aleksandra Świdarska	
6. Co powstrzymuje nas przed przeciwdziałaniem zmianie klimatu?	100
Magdalena Budziszewska, Aleksandra Świdarska, Adrian Wójcik	
6.1. Zaprzeczanie zmianie klimatu. Jak to wyjaśnić?	101
Aleksandra Świdarska	
6.2. Postawy wobec zmiany klimatu w Polsce	106
Adrian Wójcik	
6.3. Jakie są bariery dla zachowań prośrodowiskowych?	111
Magdalena Budziszewska, Aleksandra Świdarska	
7. Wpływ rozwoju gospodarczego na stan klimatu i przyrody	119
Zbigniew Bohdanowicz, Marek Giergiczny	
7.1. Jak do kryzysu klimatycznego i ekologicznego podchodzi ekonomia?	120
Zbigniew Bohdanowicz	
7.2. Protokół montrealjski jako przykład skutecznego międzynarodowego porozumienia ekologicznego	137
Marek Giergiczny	
III. KONSEKWENCJE	
8. Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę nieożywioną?	144
Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
8.1. Zmiana klimatu to zmiana w statystyce zjawisk meteorologicznych	145
Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
8.2. Scenariusze na przyszłość	149
Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
8.3. Zmiany w pogodzie	153
Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
8.4. Zmiany w oceanie i kriosferze	163
Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
9. Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę ożywioną?	171
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	
9.1. Dostępność wody	172
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	
9.2. Wpływ zmiany klimatu na osobniki, populacje, gatunki	176
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	
9.3. Różnorodność biologiczna a funkcjonowanie ekosystemów	178
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	
9.4. Wpływ człowieka na różnorodność biologiczną	183
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	
9.5. Efekty bezpośrednie i sprzężenia zwrotne	186
Andrzej Mikulski, Barbara Pietrzak	

10. Połączenia. Jak zmiany w biosferze wpływają na klimat?	189
Wiktor Kotowski, Aleksandra Kardaś	
10.1. Klimatyczne sprzężenia zwrotne – czy mamy na nie wpływ?	190
Wiktor Kotowski, Aleksandra Kardaś	
10.2. W jaki sposób ekosystemy magazynują węgiel?	197
Wiktor Kotowski	
10.3. Klimat a ekosystemy lądowe	199
Wiktor Kotowski	
10.4. Nie tylko zmiana klimatu. Granice planetarne, czyli jaka jest odporność biosfery na działania człowieka?	208
Wiktor Kotowski	
11. Społeczne i psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu	214
Magdalena Budziszewska, Zbigniew Bohdanowicz	
11.1 Wpływ zmiany klimatu na nierówności i migracje na świecie	215
Zbigniew Bohdanowicz	
11.2. Psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu	220
Magdalena Budziszewska	
11.3. Co ludzie czują wobec zmiany klimatu?	224
Magdalena Budziszewska	
11.4. Strategie radzenia sobie ze stresem	230
Magdalena Budziszewska	
IV. O ROZWIĄZANIACH	
12. Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu?	
Scenariusze ograniczania emisji i energetyka	233
Zbigniew Bohdanowicz, Aleksandra Kardaś, Paweł Gajda, Jakub Jędrak, Szymon Malinowski, Aleksandra Świdarska, Adam Rajewski	
12.1. Najważniejsze wnioski z raportu IPCC o ociepleniu o 1,5°C	234
Zbigniew Bohdanowicz, Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski	
12.2. Transformacja sektora energetycznego	240
Paweł Gajda, Adam Rajewski	
12.3. Smog a zmiana klimatu	259
Jakub Jędrak	
13. Działania ograniczające zmianę klimatu – przyroda, gospodarka, społeczeństwo	264
Magdalena Budziszewska, Zbigniew Bohdanowicz, Beata Łopaciuk-Gonczaryk, Wiktor Kotowski, Aleksandra Świdarska	
13.1. Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – rozwiązania ekonomiczne	266
Magdalena Budziszewska, Zbigniew Bohdanowicz, Beata Łopaciuk-Gonczaryk	
13.2. Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – gospodarowanie ekosystemami	277
Wiktor Kotowski	
13.3. Co mogę zrobić dla klimatu?	
Skuteczne naprawianie problemów systemowych z perspektywy jednostki	287
Magdalena Budziszewska, Zbigniew Bohdanowicz, Aleksandra Świdarska	
PODSUMOWANIE	
ZMIANA KLIMATU: 25 PYTAŃ I ODPOWIEDZI	295
BIBLIOGRAFIA	300
ŹRÓDŁA DODATKOWYCH ILUSTRACJI	312
Z RECENZJI	314



KLIMATYCZNE ABC

WSTĘP

W obliczu kryzysu klimatycznego wyjątkowo pilną potrzebą jest edukacja na ten temat zgodna ze współczesnym stanem wiedzy. Dlatego z inicjatywy naukowców z Uniwersytetu Warszawskiego we współpracy z ekspertami z innych polskich ośrodków akademickich powstał ten podręcznik.

Wspólne kompendium podstawowych zagadnień przygotowało szesnastu naukowców reprezentujących różne dziedziny wiedzy: fizycy, chemicy, biolodzy – wśród nich ekolodzy, ekonomiści, psycholodzy i inżynierowie. Jest to zatem podręcznik interdyscyplinarny, tak jak i sam problem zmiany klimatu. Wszyscy autorzy tej książki są pracownikami naukowymi zatrudnionymi w polskich uczelniach i ośrodkach badawczych, takich jak: Uniwersytet Warszawski, Politechnika Warszawska, Polska Akademia Nauk, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu i Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Podręcznik ten adresowany jest do studentów zainteresowanych podstawami wiedzy o zmianie klimatu niezależnie od kierunku studiów oraz nauczycieli i starszych uczniów szkół wszystkich stopni.

Poszczególne tematy **Klimatycznego ABC** łączą się z takimi przedmiotami, jak: fizyka, chemia, biologia z ekologią, geografia i wiedza o społeczeństwie. Zawarte w nich treści mogą stać się przedmiotem dyskusji także na lekcjach wychowawczych oraz okazać się ważnym tematem rozmów z młodzieżą dla pracujących w szkołach i poradniach psychologów i pedagogów. Podręcznikowi **Klimatyczne ABC** towarzyszy specjalny kurs internetowy pod tą samą nazwą oferowany studentom przez Uniwersytet Warszawski. Ogólnodostępne materiały z kursu, opublikowane w formacie przyjaznym uczniom i nauczycielom, zawierające dodatki audiowizualne, można znaleźć **pod adresem:** <https://klimatyczneabc.uw.edu.pl/>.

Podręcznik podzielony jest na cztery części przedstawiające: podstawowe mechanizmy (część I) i przyczyny (część II) globalnego ocieplenia, konsekwencje tego procesu (część III) oraz rozwiązania, które mogą zapobiec najbardziej negatywnym skutkom zmiany klimatu (część IV).

INTERDYSCYPLINARNOŚĆ PROBLEMU ZMIANY KLIMATU

Zmiana klimatu jest bez wątpienia jednym z najpoważniejszych wyzwań cywilizacyjnych, z jakimi ludzkość mierzy się na początku XXI wieku. Jeśli chcemy, aby nasza diagnoza problemu była prawidłowa a proponowane rozwiązania skuteczne, musimy odwoływać się do wiedzy naukowej. W debacie publicznej, w mediach i w rozmowach prywatnych często spotykamy się z wieloma nieprawdziwymi informacjami na temat zmiany klimatu, błędnymi koncepcjami, nieporozumieniami oraz dezinformacją. Dlatego naszym pierwszym krokiem 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 oraz samodzielnie ocenić środki zaradcze. W najbliższych latach będziemy świadkami coraz poważniejszych skutków zmiany klimatu. Podstawy wiedzy na ten temat są niezbędne do poruszania się po współczesnym świecie. Dlatego warto poświęcić czas, aby je zdobyć. Właśnie temu ma służyć nasz podręcznik.

KLIMAT I JEGO ZMIANA

Wielu osobom określenie „zmiana klimatu” kojarzy się głównie z zagrożeniem. To skojarzenie jest słuszne, bo problemy wynikające ze zmiany klimatu są bardzo poważne. Istnieje w tej sprawie konsensus naukowy (Pachauri i in., 2014; IPCC, 2018). Kiedy jednak spojrzy się na to zjawisko okiem badacza, dochodzi się do wniosku, że jest to zarazem niezwykle interesujący obszar poszukiwań naukowych.

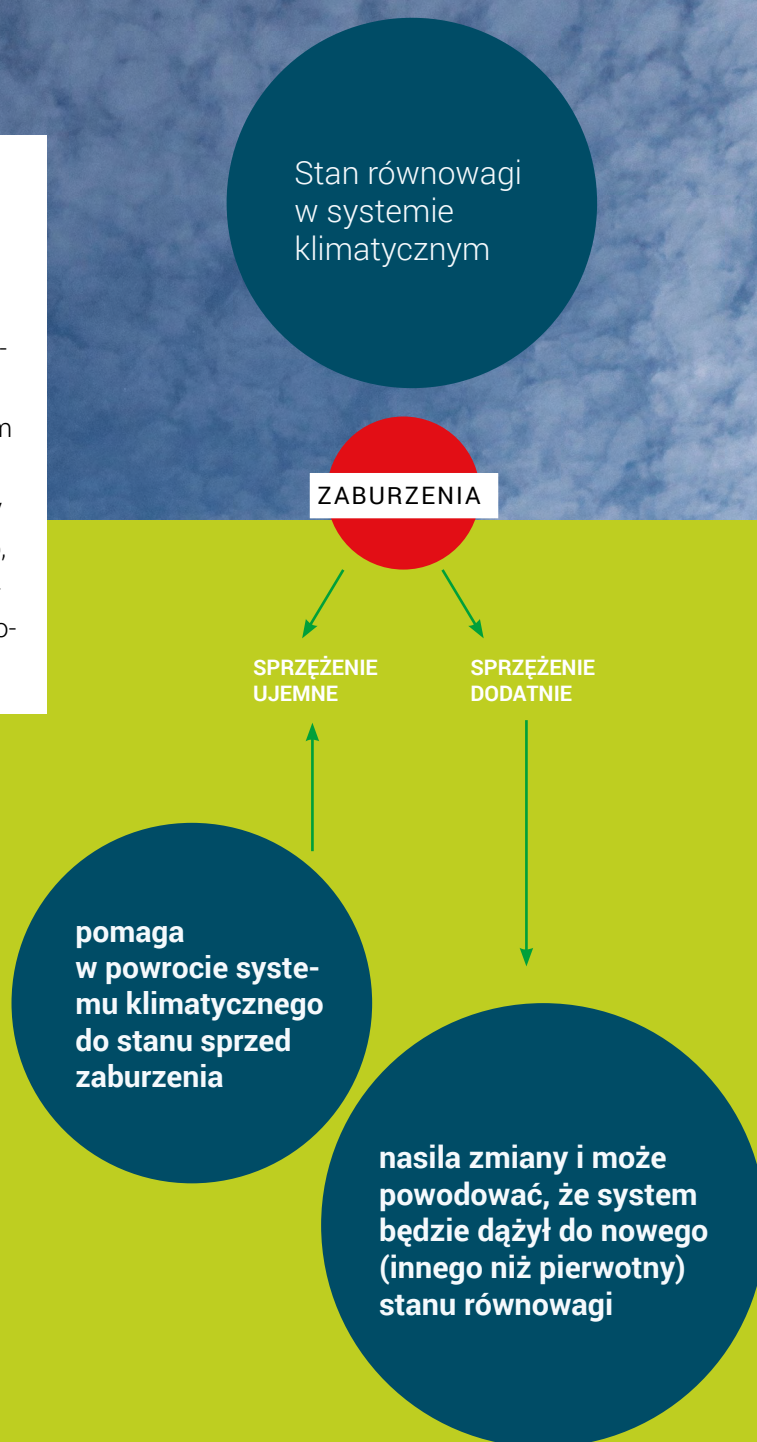
STAN RÓWNOWAGI W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM

W systemie klimatycznym Ziemi obserwujemy wiele różnych zjawisk, obejmujących:

- **materię nieożywioną** – atmosferę, oceany, skały wraz z zachodzącymi w nich reakcjami chemicznymi i przemianami fizycznymi (jak powstawanie chmur czy lodu) oraz dokonującymi się między nimi przepływami materii (np. w wyniku parowania wody). Są to zarówno procesy globalne – toczące się na przestrzeni **tysięcy lub milionów lat** (jak powolne wietrzenie skał, które prowadzi do redukcji dwutlenku węgla z atmosfery), jak i lokalne – przebiegające w czasie **sekund czy godzin** (jak powstawanie chmur lub porywanie pyłów przez wiatr);
- **żywe organizmy i całe ekosystemy tworzone z ich udziałem** – od najdrobniejszych bakterii po ogromne obszary leśne, torfowiska czy rafy koralowe. One również uczestniczą w procesach o różnych skalach czasowych, od **skali geologicznej**, kiedy ze szczątków roślin powstawały paliwa kopalne, po **coroczne fluktuacje** okresów wegetacyjnych 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 uwzględnimy tysiące lub miliony lat. System ten dąży do osiągnięcia **stanu równowagi**, w którym ilość energii uciekającej z Ziemi w kosmos jest równa ilości energii docierającej do niej ze Słońca, a ilość wody parującej z powierzchni Ziemi jest równa ilości wody spadającej w tym samym czasie w postaci deszczu czy śniegu. Każde **zaburzenie tego systemu wywołuje** w nim całą lawinę zjawisk, które mogą pomóc w powrocie do stanu sprzed zaburzenia, ale mogą też nasilić zmianę. W skrajnym przypadku dochodzi do zmiany stanu równowagi, do którego system będzie dążyć. Wtedy nawet zminimalizowanie do zera (gdyby to było możliwe) naszej ingerencji nie wystarczy do zatrzymania zmian.

Poznanie wzajemnych powiązań elementów systemu klimatycznego pozwala zrozumieć, dlaczego zapoczątkowana przez człowieka zmiana klimatu jest i może być w nadchodzącym czasie – z powodów wynikających po prostu z praw fizyki – poważnym wyzwaniem dla ludzkości. Problem ludzkiej ingerencji w system klimatyczny nie jest jednak kwestią wyłącznie przyrodniczą. To także zagadnienie z dziedziny ekonomii, funkcjonowania społeczeństw i tego, jak radzą sobie one (lub nie) z własnym rozwojem, egzystencjalnym zagrożeniem i świadomością koniecznej zmiany.



STRUKTURA PODRĘCZNIKA

We **Wstępie** do książki omawiamy powiązania i interdyscyplinarność problemu zmiany klimatu.

Część pierwsza – PODSTAWOWE MECHANIZMY – wyjaśnia najważniejsze procesy rządzące klimatem i jego zmianą.

ROZDZIAŁ 1

- Z rozdziału 1. – **Od czego zależy temperatura powierzchni Ziemi?** – można się dowiedzieć, na czym polegają przepływy energii w systemie klimatycznym i jak działa bilans energetyczny, co się dzieje, jeśli go zburzymy, oraz czym są funkcjonujące w systemie klimatycznym sprzężenia.

ROZDZIAŁ 2

- Rozdział 2. – **Jak węgiel krąży w przyrodzie?** – opisuje przepływy tego pierwiastka między poszczególnymi elementami systemu klimatycznego. Przepływy te regulują, podgrzewają lub schładzają klimat. Z tej części można się też dowiedzieć, dlaczego w tych procesach kluczową rolę odgrywa ocean.

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

ROZDZIAŁ 3

- W rozdziale 3. – **Skąd się biorą antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych?** – omawiamy zagadnienia dotyczące procesów technicznych, rolniczych i innych prowadzonych przez człowieka, które powodują emisję poszczególnych gazów cieplarnianych, a także wskazujemy sektory gospodarki, które za to odpowiadają.

ROZDZIAŁ 4

- Rozdział 4. – **Dlaczego emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną?** – udziela odpowiedzi na pytania o to, jak zachowują się i gospodarują ludzie, jeśli pewne zasoby są wspólne i darmowe, oraz jak rozwój gospodarki, wzrost populacji i poprawa poziomu życia wiążą się z emisją gazów cieplarnianych.

ROZDZIAŁ 5

- W rozdziale 5. – **Fakty i mity o zmianie klimatu** – przedstawiamy dowody naukowe na to, że obecna zmiana klimatu jest spowodowana działalnością człowieka. Przyglądamy się też najczęściej powtarzanym mitom na temat zmiany klimatu.

- Tematem rozdziału 6. – **Co powstrzymuje nas przed przeciwdziałaniem zmianie klimatu?** – są postawy społeczne wobec globalnego ocieplenia. Omawiamy w nim przeszkody psychologiczne, które sprawiają, że ludziom tak trudno jest adekwatnie zareagować na fakty wynikające ze zmiany klimatu. Relacjonujemy także pogląd określany jako negacjonizm klimatyczny i analizujemy jego przyczyny.
- W rozdziale 7. – **Wpływ rozwoju gospodarczego na stan klimatu i przyrody** – opisujemy mainstreamowe i alternatywne teorie ekonomiczne wyjaśniające procesy, które doprowadziły do aktualnego kryzysu klimatycznego i ekonomicznego.

ROZDZIAŁ 6

ROZDZIAŁ 7

W **części trzeciej – KONSEKWENCJE** – skupiamy się na przyszłości, mówimy o tym, jak daleko zaszła zmiana klimatu, jakie przewiduje się dalsze scenariusze jej rozwoju i jakie mogą być tego konsekwencje.

- W rozdziale 8. – **Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę nieożywioną?** – wyjaśniamy, jak w praktyce przejawia się globalne ocieplenie, jakie zmiany występują (i mogą wystąpić) w elementach przyrody nieożywionej oraz tłumaczymy, jak wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi przekłada się na zmiany statystyk pogodowych, poziomu morza czy masy lodowców i lądolodów.
- W rozdziale 9. – **Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę ożywioną?** – opisujemy skutki zmiany klimatu dla ekosystemów, gatunków i bioróżnorodności.
- W rozdziale 10. – **Połączenia. Jak zmiany w biosferze wpływają na klimat?** – przedstawiamy zmianę klimatu w kontekście innych problemów ekologicznych, wprowadzamy pojęcie granic planetarnych, a także pokazujemy, jak powiązane są ze sobą poszczególne systemy umożliwiające życie na Ziemi.
- W rozdziale 11. – **Społeczne i psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu** – omawiamy skutki zmiany klimatu z perspektywy społecznej. Są one bardzo poważne, obejmują: migracje, zwiększanie się skrajnych nierówności społecznych oraz wyższe ryzyko wystąpienia konfliktów zbrojnych. Druga część tego rozdziału dotyczy psychologii, a w szczególności wpływu zmiany klimatu na emocje, stres i zdrowie psychiczne. Lęk i depresja związane ze świadomością zmian klimatycznych stają się problemem, o którym mówi się na całym świecie. Podajemy tu również ogólne wskazówki dotyczące sposobów radzenia sobie w przewlekłych sytuacjach stresowych.

ROZDZIAŁ 8

ROZDZIAŁ 9

ROZDZIAŁ 10

ROZDZIAŁ 11

ROZDZIAŁ 12

ROZDZIAŁ 13

Część czwartą – O ROZWIĄZANIACH – poświęcamy scenariuszom przyszłości zależnym od tego, jakie drogi redukcji emisji gazów cieplarnianych zostaną wybrane. Piszemy o rozmaitych rozwiązaniach w różnych dziedzinach gospodarki, o działaniach mających na celu regenerację przyrody, a także o społecznych i ekonomicznych uwarunkowaniach dążenia do zmiany.

- W rozdziale 12. – **Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu? Scenariusze ograniczania emisji i energetyka** – przedstawiamy najważniejsze działania, które (zgodnie z podsumowaniem Międzynarodowego Panelu ds. Zmiany Klimatu; IPCC, 2018) mogłyby doprowadzić do zatrzymania wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi na stosunkowo bezpiecznym poziomie (ocieplenie poniżej 1,5°C względem czasów przedprzemysłowych). Następnie omawiamy zagadnienia dotyczące energetyki, kluczowego sektora gospodarki dla zmiany klimatu, i przyglądamy się powiązaniom zmiany klimatu z problemem jakości powietrza i zjawiskiem smogu. Są to dwa często mylone ze sobą zagadnienia, a jednocześnie problem smogu jest bardzo ważny, zwłaszcza w Polsce. Niestety, nie wszystkie sposoby jego redukcji pomagają ograniczać zmianę klimatu.
- W rozdziale 13. – **Działania ograniczające zmianę klimatu – przyroda, gospodarka i społeczeństwo** – omawiamy różne sposoby ograniczania emisji i usuwania dwutlenku węgla z atmosfery, polegające na przywracaniu równowagi zniszczonym ekosystemom i stosowane w rolnictwie. Działania obejmujące biosferę, takie jak odtwarzanie bagiennych stref buforowych przy rzekach czy restytucja ekosystemów, są pomocne w ograniczaniu zmiany klimatu, ale nie wystarczą do jej zatrzymania na odpowiednim poziomie. Opisujemy także różne rozwiązania i instrumenty ekonomiczne, które mogą pomóc w redukcji emisji gazów cieplarnianych. Rozważamy również sposoby postępowania możliwe do zastosowania na poziomie jednostki: omawiamy zasady, jakie rządzą indywidualnym i zbiorowym działaniem na rzecz klimatu, wskazując zarazem pojawiające się tu paradoksy i zwracając uwagę na opisywane w naukach społecznych dylematy, jakie wiążą się z dążeniem do zmiany społecznej.

Na końcu podręcznika zamieściliśmy jego krótkie **PODSUMOWANIE** w postaci **25 pytań i odpowiedzi** dotyczących najważniejszych zagadnień związanych ze zmianą klimatu i jeszcze raz wyjaśniających najczęstsze mity krążące na ten temat.

Gdyby ludzkość przystąpiła do przeciwdziałania zmianie klimatu wcześniej, jej zahamowanie byłoby dużo prostsze. Teraz już wiemy, że nie możemy niczego odkładać na później: im szybciej i bardziej zdecydowanie zareagujemy, tym nasze szanse na powstrzymanie tempa wzrostu zagrożenia będą większe.

Zwiększenie się koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze powoduje wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, co potocznie nazywane jest **globalnym ociepleniem**. W naszym podręczniku często posługujemy się jednak pojęciem **zmiana klimatu** jako terminem 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 występowały także w przeszłości, w geologicznej historii Ziemi, wtedy jednak dokonywały się z innych przyczyn, w zupełnie innym tempie i w odmiennych 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 często kojarzy się z czymś raczej nieszkodliwym albo wręcz przyjemnym, nie oddaje sensu tego zjawiska i może być mylący.

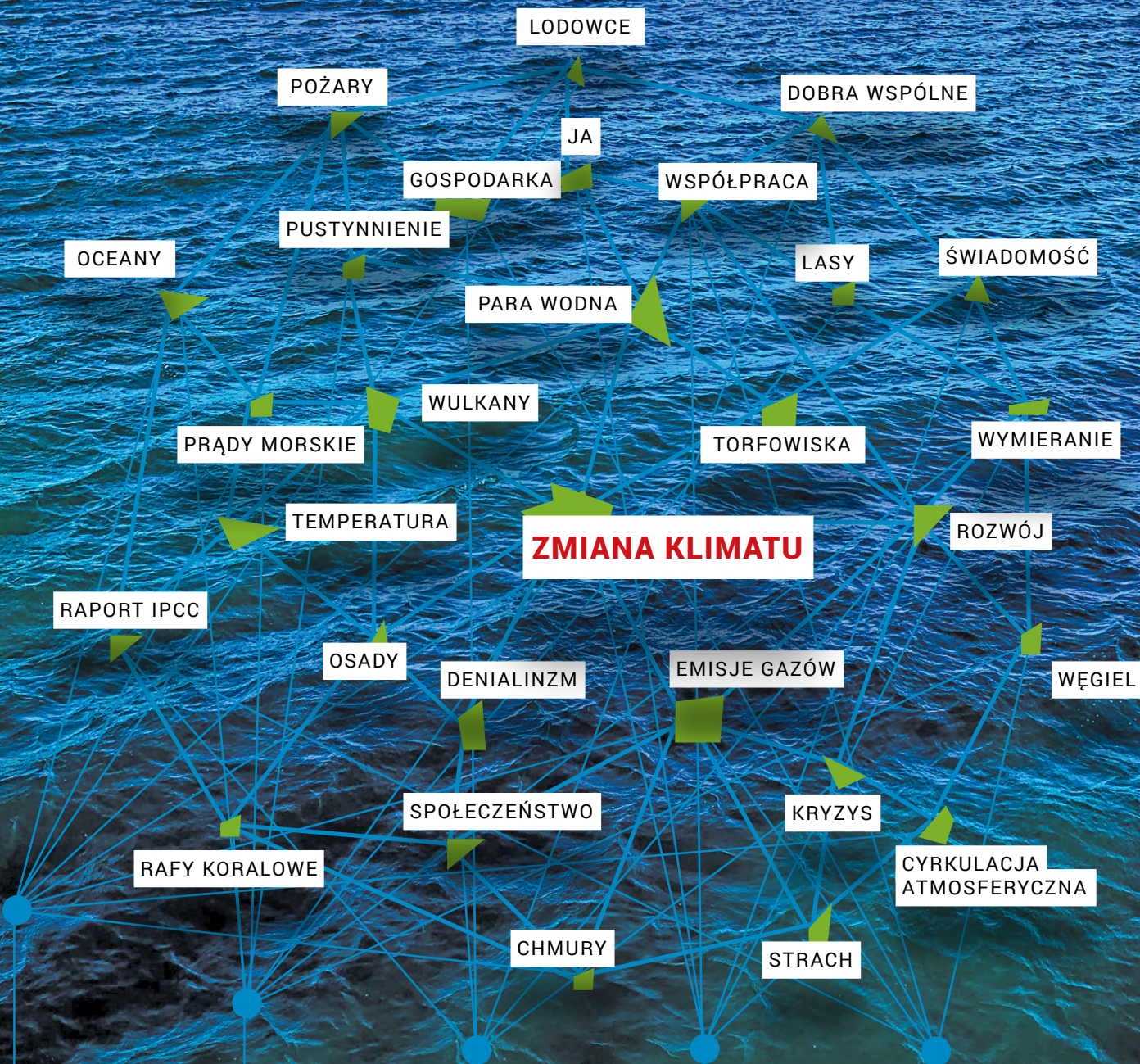


TERMINOLOGIA

PYTANIA DO REFLEKSJI

Przez najbliższy tydzień zwróć uwagę na to, w jaki sposób kwestia zmiany klimatu jest poruszana w mediach, jak rozmawiają o tym Twój bliscy i znajomi. Na co zwraca się uwagę, jak to zjawisko jest postrzegane i dlaczego?

Zastanów się, co Ty sądzisz o tym zjawisku? Co już wiesz na ten temat, a co budzi Twoje wątpliwości? Czego chciałbyś się dowiedzieć z tego podręcznika? Zastanów się przez najbliższy tydzień nad problemem zmiany klimatu i potraktuj to jako przygotowanie do dalszych zagadnień poruszanych w tej książce.



FI ZY KA

Aleksandra
Kardaś

Jakub
Jędrak

Szymon
Malinowski

BIO LO GIA

Wiktor
Kotowski

Andrzej
Mikulski

Barbara
Pietrzak

Barbara Pietrzak

E KO NO MIA

Zbigniew
Bohdanowicz

Tomasz
Żylicz

Jan
Witajewski-Baltvilks

Beata
Łopaciuk-Goncaryk

Marek
Giergiczny

PSY CHO LO GIA

Magdalena
Budziszewska

Aleksandra
Świderska

Adrian
Wójcik

ENER GE TY KA

Paweł
Gajda

Adam
Rajewski

AUTORZY



Zbigniew Bohdanowicz – ekonomista, psycholog. Pracuje w Laboratorium Interaktywnych Technologii w Ośrodku Przetwarzania Informacji – Państwowym Instytucie Badawczym, gdzie prowadzi badania dotyczące transformacji sektora energetycznego w UE, świadomości energetycznej społeczeństw oraz postaw wobec nowych rozwiązań. Jest doktorantem Wydziału Nauk Ekonomicznych UW, zajmuje się społecznymi i ekonomicznymi aspektami zmiany klimatu.



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 co dzikie.



dr inż. Paweł Gajda – inżynier energetyk, pracownik Wydziału Energetyki i Paliw AGH w Krakowie. Naukowo zajmuje się głównie energetyką jądrową, a dokładniej – 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.



dr hab. Marek Giergiczy – adiunkt na Wydziale Nauk Ekonomicznych UW i pracownik Warszawskiego Ośrodka Ekonomii Ekologicznej. W 2006 roku ukończył Międzywydziałowe Studia Ochrony Środowiska. 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 ramach których zajmuje się popularyzacją wiedzy o wpływie zanieczyszczeń powietrza na zdrowie ludzkie. Jego teksty poświęcone ochronie środowiska, w szczególności zmianie klimatu i jej konsekwencjom, ukazują się na portalu smoglab.pl oraz na stronie naukaoklimacie.pl.



dr Aleksandra Kardaś – fizyczka atmosfery, redaktorka serwisu „Nauka o klimacie” i współautorka książki pod tym samym tytułem. W czasie pisania tego podręcznika pracowniczka Wydziału Fizyki UW. Zajmuje się popularyzacją wiedzy na temat pogody i klimatu. Interesują ją procesy rozprzestrzeniania się informacji i dezinformacji.



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-Goncaryk – 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 w dziedzinie 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*.



dr hab. Andrzej Mikulski – biolog, ekolog, hydrobiolog, pracownik Wydziału Biologii UW. Naukowo zajmuje się wpływem czynników biotycznych i abiotycznych na organizmy i jego konsekwencjami dla funkcjonowania systemów biologicznych. Zajmuje się też ochroną i rekultywacją jezior oraz ochroną rzek. Lubi góry i lodowce, chętnie podróżuje.



dr Barbara Pietrzak – ekolożka, pracowniczka Wydziału Biologii UW. Naukowo zajmuje się plastycznością behawioru zwierząt wobec wyzwań środowiskowych oraz historią ich życia w obliczu zmian klimatycznych. Prowadzi badania nad kształtowaniem się indywidualności behawioralnej zwierząt oraz zajęcia dotyczące współczesnych zmian środowiska i związanych z nimi zagrożeń dla człowieka i biosfery. Współzałożycielka ruchu „Nauka 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. Pracuje w międzynarodowej firmie dostarczającej urządzenia dla energetyki, gdzie zajmuje się projektowaniem układów niskoemisyjnego zasilania dla centrów danych.



dr Aleksandra Świdarska – 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.



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 wielu projektach mających na celu oszacowanie kosztów związanych z polityką klimatyczną.



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.



prof. dr hab. Tomasz Żylicz – pracownik Wydziału Nauk Ekonomicznych UW od 1974 roku; w latach 1978–1979 studiował na Uniwersytecie Wisconsin, USA; 1988–1989 pracował w Instytucie Nauk Behawioralnych na Uniwersytecie Colorado w Boulder, USA (profesor wizytujący), a w 1992–1993 w Szwedzkiej Królewskiej Akademii Nauk w Sztokholmie. W latach 1992–1993, podczas urlopu na UW, był zatrudniony w Ministerstwie Ochrony Środowiska. W 1993 roku otrzymał nagrodę „Pew Scholar Award in Conservation and the Environment”. Wykorzystał towarzyszący jej grant na stworzenie Warszawskiego Ośrodka Ekonomii Ekologicznej na UW, którym kierował w latach 1993–2008. Od 2005 do 2012 roku pełnił funkcję Dziekana Wydziału Nauk Ekonomicznych UW. Autor wielu artykułów i książek głównie z zakresu z ekonomii ekologicznej.

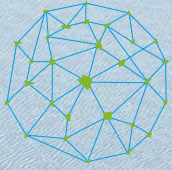
PODZIĘKOWANIA

Serdecznie dziękujemy za pomoc organizacyjną i redakcyjną oraz inspirację Katarzynie Łukaszewskiej, Małgorzacie Podstawie i Justynie Szczepanik, które wspierały proces powstawania tej książki. Bez ich 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: Joanna Lilpop z Pracowni Dydaktyki Biologii, Anna Albin z Ogrodu Botanicznego oraz profesorowie Joanna Pijanowska z Wydziału Biologii UW i Jacek Pniewski z Wydziału Fizyki UW, a także redaktorka portalu naukaoklimacie.pl Anna Sierpińska.

Magdalena Budziszewska dziękuje społeczności Wydziału Psychologii UW za odczuwalne i praktyczne wsparcie, które miało duże znaczenie dla powodzenia tego projektu.



1. Od czego zależy temperatura powierzchni Ziemi?

By zrozumieć, w jaki sposób nasza cywilizacja wpłynęła na klimat całej planety, oraz móc wiarygodnie ocenić konsekwencje zachodzącego obecnie globalnego ocieplenia, musisz poznać kilka podstawowych pojęć.

Ten rozdział 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 powiemy, co może doprowadzić do **zaburzenia bilansu energetycznego Ziemi**, a w rezultacie do globalnej zmiany klimatu. Procesy te mogą mieć charakter wymuszeń (taki ma działalność człowieka prowadząca do emisji gazów cieplarnianych) lub sprzężeń (których przykładem są zmiany w pokrywie lodowej wynikające z ocieplenia albo ochłodzenia danego obszaru). Umiejętność rozróżnienia pojęć **wymuszenia** i **sprzężenia** przyda się nam w kolejnych rozdziałach, w których opisywać będziemy różne efekty będące skutkiem zmiany klimatu i mogące zarazem prowadzić do jej nasilania.

Myśląc o postępującym obecnie ocieplaniu się klimatu, mamy tendencję do zakładania, że związek między 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,
- i 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 stają się niepowstrzymywalne. To oznacza, że jeśli ocieplenie zajdzie za daleko, możemy utracić możliwość zahamowania wzrostu temperatury oraz innych związanych z tym zjawisk. Temu ważnemu zagadnieniu będzie poświęcona ostatnia część tego rozdziału.

1.1. Jak działa efekt cieplarniany?

Efekt cieplarniany to naturalne zjawisko kształtujące klimat Ziemi.

Jest następstwem tego, że ziemską atmosferę (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°C niższa.

ENERGIA DLA ZIEMI

Pierwotnym źródłem energii dla wszelkich procesów zachodzących na powierzchni Ziemi czy w atmosferze jest Słońce. Przekazuje ono 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–Boltzmann.

Ziemia dąży do tego, aby emitować w przestrzeń kosmiczną taką samą ilość energii, jaką otrzymuje od Słońca. To kwestia bilansu energii: kiedy 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. Kiedy emisja jest za duża, dochodzi do deficytu energii i spadku temperatury, co zmniejsza emisję promieniowania.

Na sposób, w jaki 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 pełnią w atmosferze funkcję podobną do dachu szklarni: przepuszczają krótkofalowe 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 promieniowanie ziemskie to podczerwień.

Bilans energii

Aby obliczyć 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.

słoneczne, ale pochłaniają promieniowanie długofalowe, podczerwone. Wskutek tego atmosfera się ogrzewa i sama również zaczyna emitować promieniowanie podczerwone, częściowo w górę, w przestrzeń kosmiczną, a częściowo w dół, w stronę powierzchni planety, przez którą jest pochłaniane (ilustracja 1.1.1.). Dzięki temu „zwrotowi” energii powierzchnia Ziemi ma temperaturę wyższą (o ponad 30°C!), niż miałaby, gdyby atmosfery nie było. Zjawisko to nazywamy efektem cieplarnianym.

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

Ilustracja 1.1.1. Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery.

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

E_0 – promieniowanie słoneczne

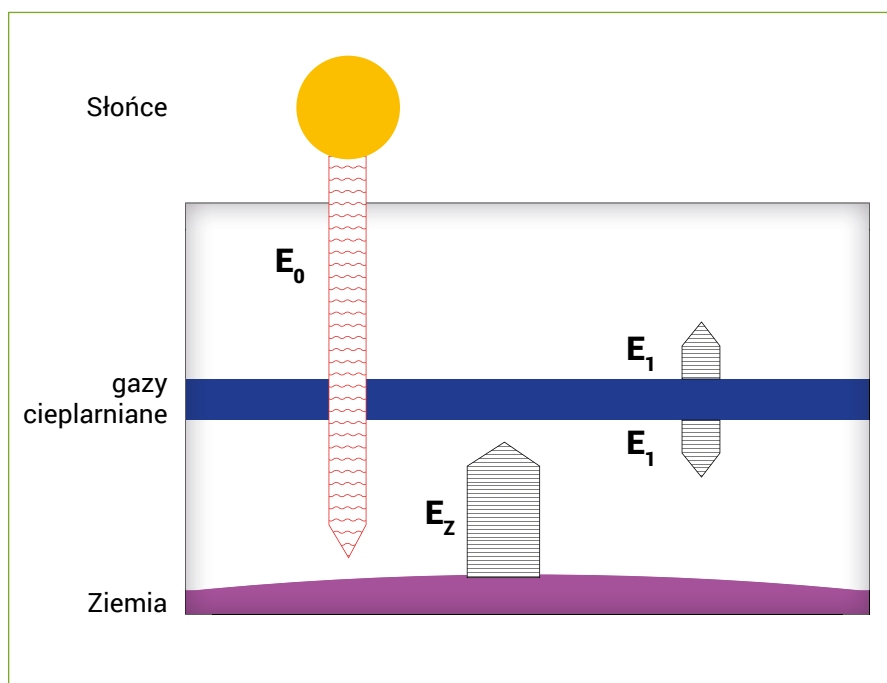
E_Z – promieniowanie ziemskie

E_1 – promieniowanie atmosfery, a mówiąc ściślej: zgromadzonych w niej gazów cieplarnianych

Zachowanie bilansu energetycznego

wymaga, aby: $E_0 = E_1$

oraz $E_Z = 2E_0$



DEFINICJA

EFEKT CIEPLARNIANY – zjawisko polegające na podwyższeniu średniej temperatury powierzchni planety w wyniku interakcji atmosfery i promieniowania podczerwonego emitowanego przez jej powierzchnię.

RZECZYWISTOŚĆ JEST TROCHĘ BARDZIEJ SKOMPLIKOWANA

Przedstawiony opis bilansu energetycznego atmosfery jest oczywiście bardzo uproszczony. Gdybyśmy chcieli przedstawić go dokładniej, musielibyśmy uwzględnić rozpraszanie promieniowania słonecznego przez chmury, aerozol atmosferyczny (zawieszone w atmosferze cząstki stałe i płynne) i powierzchnię Ziemi. Zwróciłibyśmy 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 w wyniku 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, gdy para wodna się skrapla (ciepło utajone). Ponadto fale podczerwone z pewnego wąskiego zakresu długości (zwanego oknem atmosferycznym) nie są absorbowane przez gazy cieplarniane, dzięki czemu uciekają w kosmos. Warto wiedzieć, że takie procesy zachodzą, nie są one jednak kluczowe dla zrozumienia podstaw efektu cieplarnianego.

Uśredniony (dla całej planety i całego roku) bilans energetyczny atmosfery uwzględniający wszystkie wspomniane efekty, przedstawiono na ilustracji 1.1.2. Jak widzisz, bilans nie jest obecnie zrównoważony. Ziemia emituje mniej energii w kosmos niż otrzymuje od Słońca – właśnie o tym mówimy w naszej książce.

CHYBA WIESZ, ŻE ?

Gdyby nie efekt cieplarniany, średnia temperatura powierzchni Ziemi byłaby o ponad 30°C niższa niż obecnie.

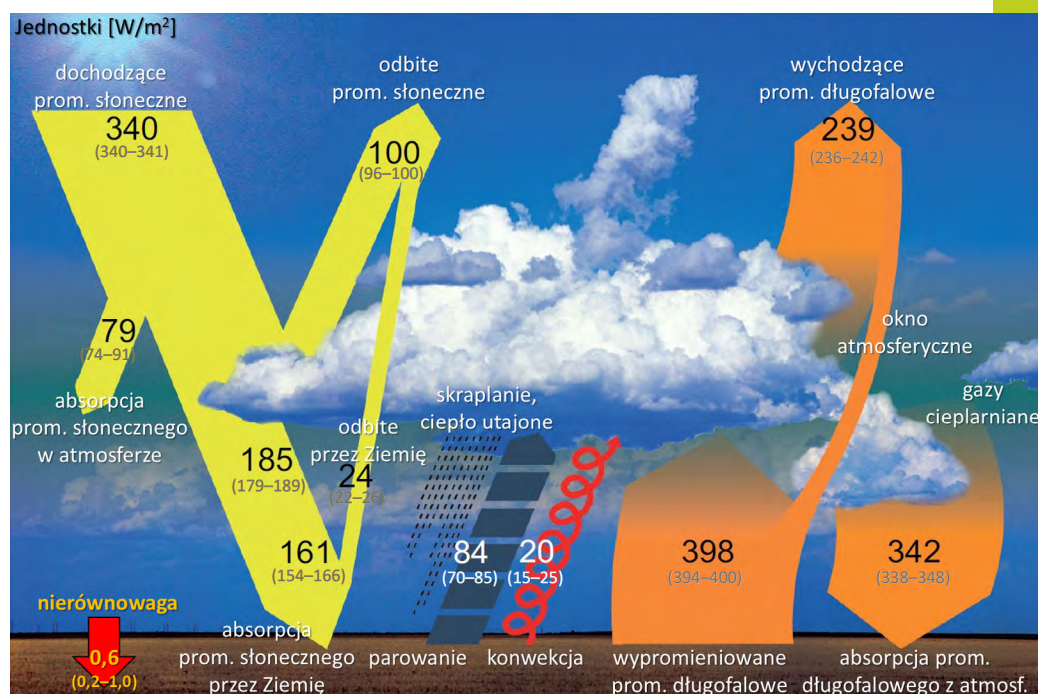


Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Efekt cieplarniany
– jak to działa



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH



Ilustracja 1.1.2. 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.

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

1.2. Co się dzieje, gdy zaburzamy bilans energetyczny atmosfery?

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

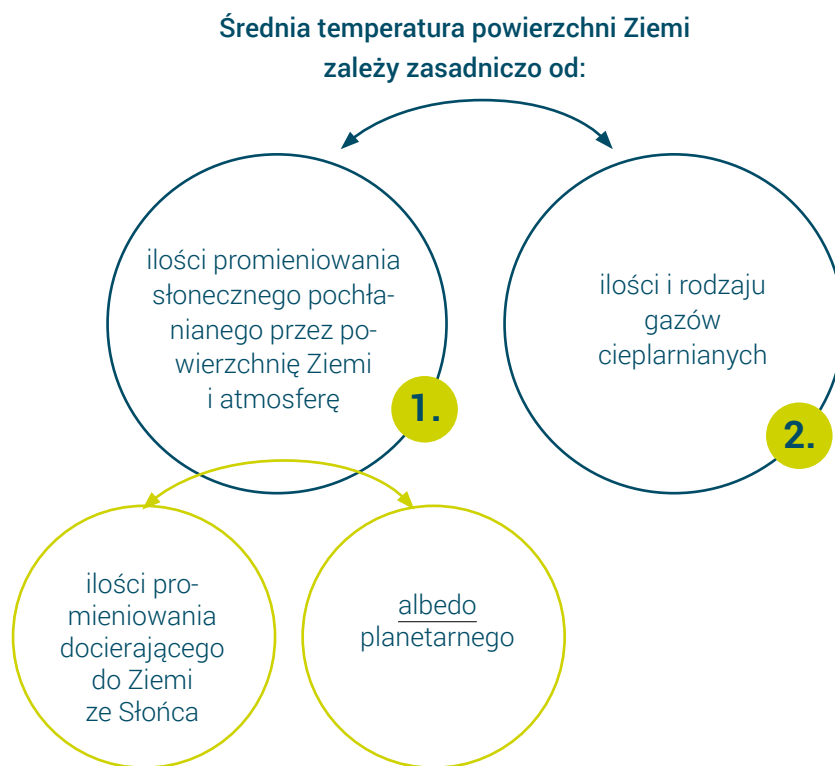
Wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze prowadzi do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi (ocieplenia klimatu).

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.

CZY WIESZ, ŻE ?

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

albedo to wielkość mówiąca o tym, 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.



Ilustracja 1.2.1. Podstawowe czynniki decydujące o średniej temperaturze powierzchni Ziemi.

DEFINICJA

ALBEDO PLANETARNE – wielkość mówiąca o tym, jaka część promieniowania gwiazdy (w przypadku Ziemi – Słońca) jest rozpraszana w kosmos, łącznie przez powierzchnię planety i wszystkie jej elementy.



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.

Ilustracja 1.2.2. Znaczenie albedo dla ilości promieniowania odbijanego i pochłanianego przez powierzchnię Ziemi na przykładzie lodu i wody.

Co się dzieje...

1.

kiedy zmienia 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 – oraz w atmosferze, dopóki nie osiągną one temperatury na tyle wysokiej, by wypromieniowywały 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, wysyłając promienie podczerwone. Zmniejszona absorpcja promieniowania słonecznego oznacza jednak, że straty energii nie są równoważone. Stopniowo 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.

Co się dzieje...

2.

kiedy zmieni się ilość gazów cieplarnianych w atmosferze?

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.

Kiedy w atmosferze przybędzie gazów cieplarnianych, Ziemia się nagrzeje.

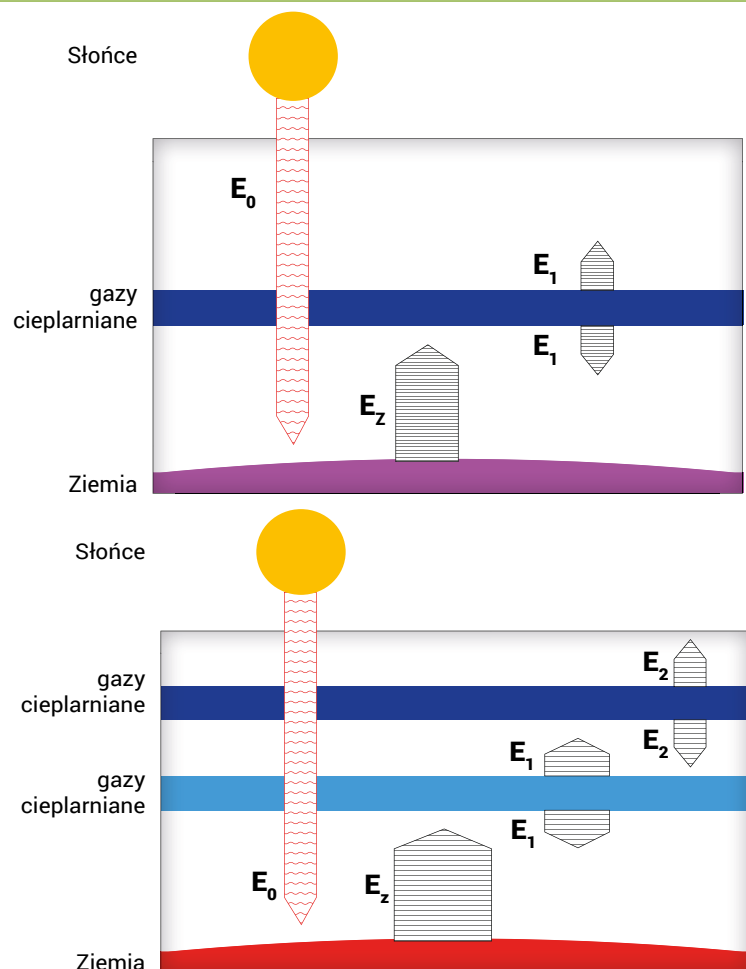
Chociaż planeta pochłania wciąż tyle samo energii słonecznej, pozbywanie się energii przez powierzchnię Ziemi jest utrudnione. Więcej gazów cieplarnianych oznacza, że dolne warstwy atmosfery wydajniej pochłaniają promieniowanie ziemskie. Ilość energii emitowanej z górnych partii atmosfery w kosmos staje 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.

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: $E_2 = E_0$, $E_1 = 2E_0$, $E_z = 3E_0$



UWAGA! W rzeczywistości gazy cieplarniane nie tworzą w atmosferze wyodrębnionych warstw.

Ilustracja 1.2.3. Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery, ułatwiający wyobrażenie sobie, co się dzieje, kiedy jest w niej coraz więcej gazów cieplarnianych.

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

Choć ze Słońca dociera cały czas tyle samo energii, to pozbywanie się jej przez Ziemię 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 wypromieniwanej 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 ?

Efekt cieplarniany oraz konsekwencje wzrostu lub spadku koncentracji gazów cieplarnianych opisano już w XIX wieku.



Więcej na temat historii badań klimatu dowiesz się ze strony www.naukaoklimacie.pl



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH



ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

1.3. 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 podrozdziałów wiesz już, że zmiana średniej temperatury powierzchni Ziemi to efekt zaburzenia jej bilansu energetycznego, czyli przyrostu lub ubytku energii w systemie klimatycznym.

DEFINICJA

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

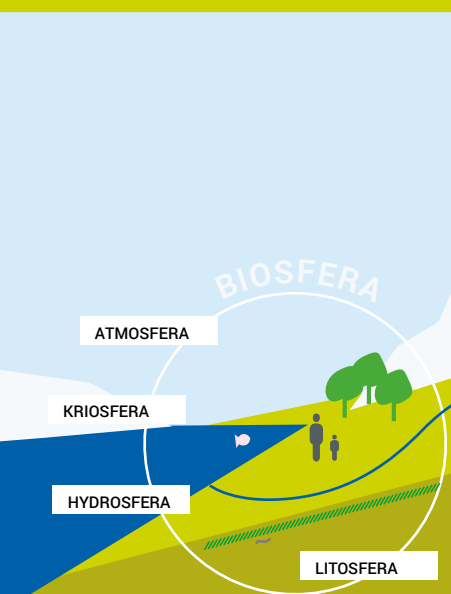
Atmosfera to gazowa powłoka Ziemi. Rozciąga się od powierzchni planety, a jej górna granica jest umowna (im wyżej, tym powietrze staje się rzadsze i atmosfera stopniowo przechodzi w próżnię). Gdyby atmosfera miała gęstość taką jak woda, utworzyłaby na powierzchni Ziemi warstwę grubości zaledwie 10 metrów. Około 90% masy atmosfery znajduje się poniżej wysokości 20 kilometrów, 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). Około 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 też zapominać, że para wodna to ważny gaz cieplarniany, a obecność chmur lub śniegu jest ważna ze względu na 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 ze wzrostem koncentracji gazów cieplarnianych, jest zużywane na topnienie lodów. W wyniku topnienia lodów oceany zasilane są przez duże 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) razem ze wszystkimi zamieszkującymi Ziemię organizmami. Mogą one przyczyniać się do emisji gazów cieplarnianych, ich pochłaniania, zmian albedo i stosunków wodnych.

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



Ilustracja 1.3.1. Składniki biosfery.

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 się 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 są już efektem wcześniejszych zmian w systemie klimatycznym.

WYMUSZENIA – zjawiska wpływające na klimat, pochodzące z zewnątrz systemu klimatycznego.

DEFINICJA

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 innych materiałów. O występowaniu pierwszych decydują przede wszystkim zjawiska zachodzące w głębi Ziemi, a o drugich – ludzkie decyzje i możliwości techniczne.

Wymuszenie może zainicjować w systemie klimatycznym Ziemi cały łańcuch zmian wtórnie wpływających na bilans energetyczny naszej planety.

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

Orbita Ziemi 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 – zjawiska wpływające na klimat zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego, będące skutkiem wymuszeń.

DEFINICJA

Do najbardziej oczywistych sprzężeń należą na przykład zmiany w nasileniu parowania albo zasięgu lodu unoszącego się na powierzchni oceanu w wyniku wzrostu lub spadku temperatury powietrza lub oceanu spowodowanego przez wymuszenie. 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 – odpowiedź systemu klimatycznego osłabiająca działanie wymuszenia.

DEFINICJA

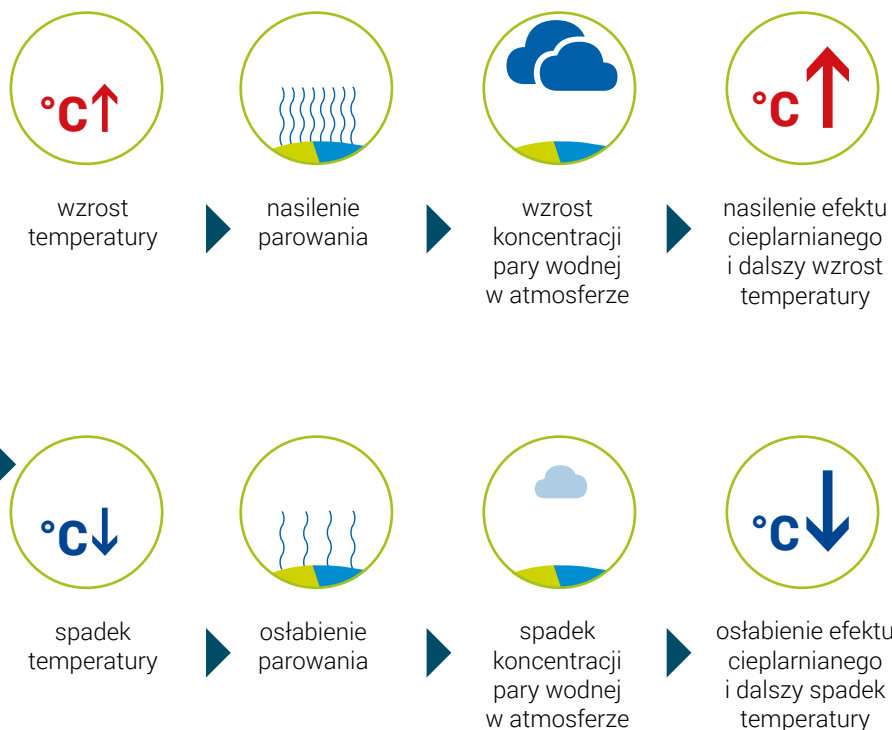
Przykładem ujemnego sprzężenia jest wzrost ilości energii wypromieniowywanej przez planetę w wyniku wzrostu jej temperatury – spowalnia to wzrost temperatury i stabilizuje system.

DEFINICJA

DODATNIE SPRĘŻENIE KLIMATYCZNE – odpowiedź systemu klimatycznego wzmacniająca działanie wymuszenia.

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

Ilustracja 1.3.2. Schemat dodatniego sprzężenia klimatycznego związanego z parą wodną. Na górze: reakcja systemu klimatycznego na wzrost temperatury, na dole: jego reakcja na spadek temperatury.

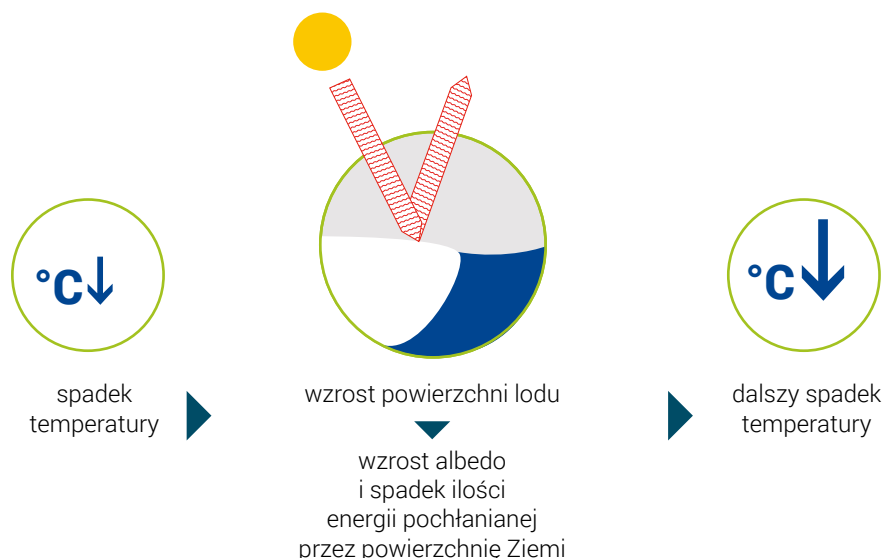


Silne sprzężenie dodatnie może zdestabilizować układ, wprowadzając go w inny stan równowagi.

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



Ilustracja 1.3.3. Schemat dodatniego sprzężenia klimatycznego związanego z albedo wody i lodu morskiego: reakcja systemu na wzrost oraz na spadek temperatury.



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), lub ocieplaniu klimatu, jeśli je pochłaniają (np. sadza).

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

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



NAUKA O KLIMACIE
DLA SPOŁECZEŃSTWA



Więcej na ten temat dowiesz się z rozdziału 2., opisującego obieg węgla w przyrodzie.

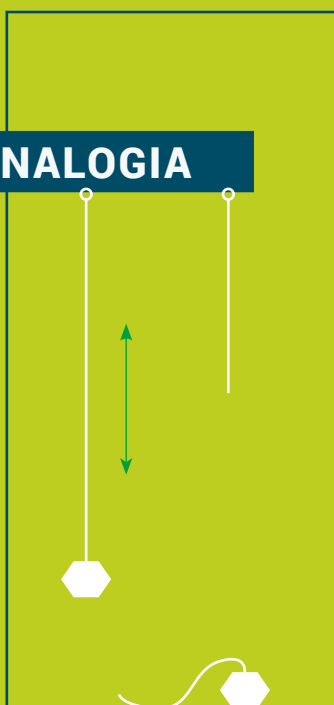
Góra lodowa oderwana od lodowca Pine Island i dryfująca w Oceanie Lodowatym 4 listopada 2012 roku.

ALEKSANDRA KARDAŚORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski**SZYMON MALINOWSKI**ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

1.4. Punkty krytyczne w systemie klimatycznym Ziemi

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

ANALOGIA



Wyobraź sobie ciężarek zawieszony na gumce. W naturalny sposób znajduje się on na konkretnej wysokości – tej, na której równoważą 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 góra–dół, ale w końcu powróci do swojego pierwotnego położenia – punktu równowagi. Jeśli jednak pociągniesz za ciężarek tak mocno, że doprowadzisz do zerwania gumki, sytuacja nie powróci już do punktu wyjścia. A 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 układ z gumką i ciężarkiem. W miarę jak średnia temperatura powierzchni Ziemi rośnie, zjawiska te stopniowo postępują. Gdyby ocieplenie ustało, prawdopodobnie by się zatrzymały. Jeśli jednak temperatura wzrośnie zanadto, zjawiska przekroczą swoje punkty krytyczne, co pociągnie za sobą nieuchronne, znaczne i bezpowrotne zmiany. Ten efekt jest na ogół związany z występowaniem sprzężenia nasilającego zjawisko.

DEFINICJA

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

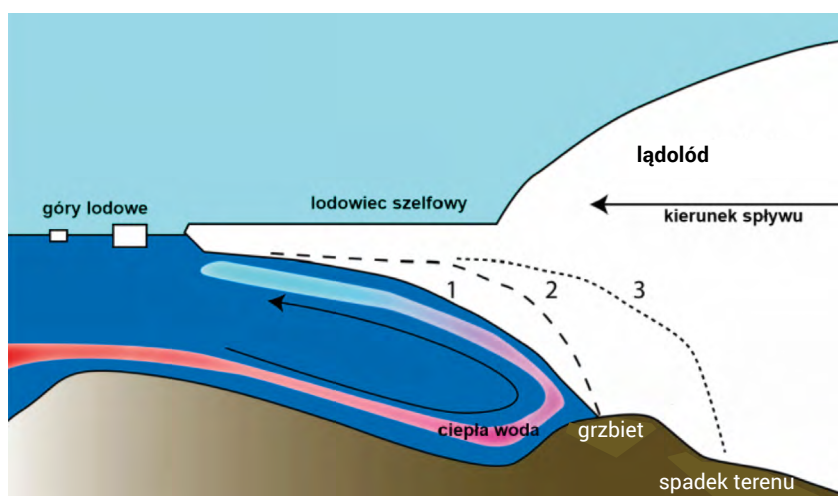
PRZYKŁADY

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 klimatu. 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 powoduje emisję metanu i dwutlenku węgla. Te gazy nasilają efekt cieplarniany, co potęguje ocieplanie się klimatu (to kolejny przykład dodatniego sprzężenia zwrotnego). Gdy odpowiednio duża objętość wieloletniej zmarzliny rozmarźnie, 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. Kiedy klimat jest stabilny, opady śniegu w głębi lądolodu wystarczają do odbudowywania strat jego masy powodowanych tym, że lód stale spływa do oceanu, gdzie topnieje i odrywają się od niego kolejne góry lodowe. Kiedy temperatura wody rośnie, topnienie staje się bardziej intensywne i czoło lodowca – jak mawiają specjaliści – się cofa (czyli jego początek znajduje się coraz bliżej lądu lub coraz dalej w jego głębi).

Ląd, na którym spoczywa lód Antarktydy Zachodniej, jest specyficznie ukształtowany – leży 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 (ilustracja 1.4.1.). Ułatwia to jednocześnie spływanie kolejnych porcji lodu z głębi lądolodu. Lodowce w tym regionie prawdopodobnie już cofnęły się na tyle, że procesu ich spływania do oceanu nie da się zatrzymać, czyli tempo ich spływania znacznie przekracza tempo odtwarzania przez opady śniegu.



Ilustracja 1.4.1. Schemat procesu topnienia 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 bardziej intensywne 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



Dla zainteresowanych:
www.glacjoblogia.wordpress.com
Czym nie jest lodowiec?

www.naukaoklimacie.pl
Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony



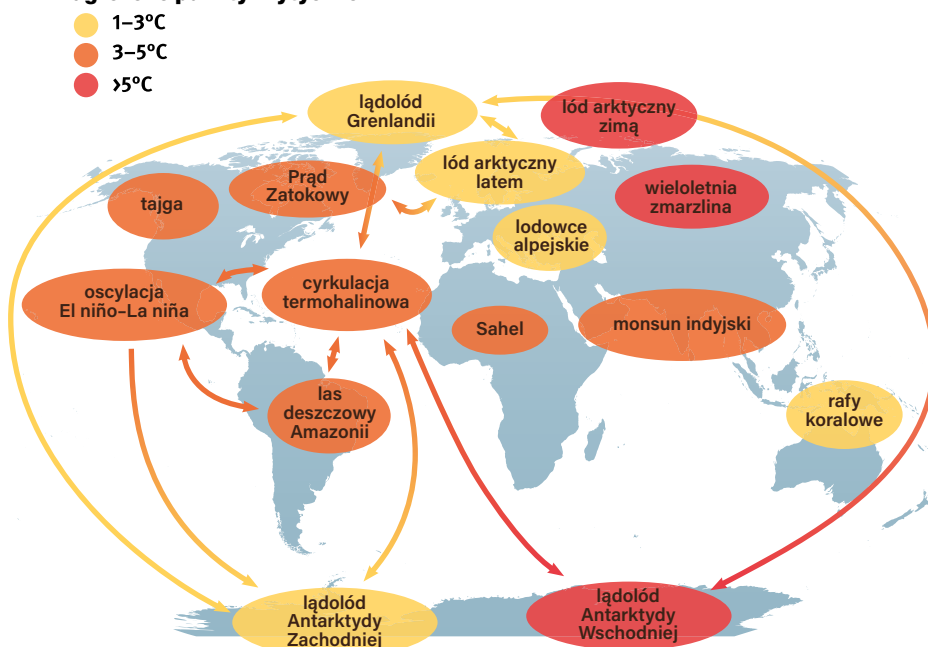
W POSZUKIWANIU PUNKTU KRYTYCZNEGO

Wyznaczenie punktów krytycznych wielkoskalowych zjawisk, takich jak zanik lodu morskiego czy zaburzenia cyrkulacji oceanicznej, jest jeszcze większym wyzwaniem niż w przypadku ciężarka na gumce. Wymaga bardzo dokładnego zbadania wielu aspektów, na przykład fizycznych lub biologicznych mechanizmów rządzących wybranym zjawiskiem, ukształtowania terenu, warunków geologicznych, wodnych itd. (zależnie od zjawiska). Nawet gdyby udało się je zbadać, wciąż pozostanie element przypadkowy – na przykład, mimo że średnia temperatura powierzchni Ziemi nie wzrośnie powyżej $1,5^{\circ}\text{C}$ 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.

Źródło: Steffen i in., 2018.

Zagrożone punkty krytyczne



ZMIANY W SKALI PLANETARNEJ

Chociaż w przykładach wymieniliśmy poszczególne zjawiska osobno, w rzeczywistości nie zachodzą one w izolacji: 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.

DEFINICJA

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



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Arktyczne wzmocnienie

Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony

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

Topnienie zmarzliny niszczy lądowe magazyny węgla

Tajga płonie. Coraz częściej

oraz
www.glacjoblogia.wordpress.com

Antarktyda jak butelka – szybko się opróżnia po odkorkowaniu

Ostatni spokojny fragment Grenlandii już niestabilny

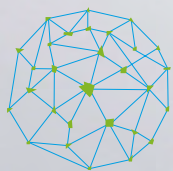
Więcej o punktach krytycznych:
na stronie www.naukaoklimacie.pl

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

Ziemia „stabilna” czy „cieplarniana”?

PYTANIA DO REFLEKSJI

Popatrz na ilustrację 1.4.2. i odpowiedz na pytania: Które z przedstawionych na niej zjawisk zagrażą nam najwcześniej? Na jakie kolejne procesy wpłyną te zmiany?



KLIMATYCZNE
ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997

Uniwersytet Warszawski

2. Jak węgiel krąży w przyrodzie?

Aby zrozumieć, jak działa system klimatyczny Ziemi i dlaczego obecna sytuacja, w której do atmosfery bardzo szybko wprowadzamy duże ilości dwutlenku węgla, jest niebezpieczna, warto poznać 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, na przykład latami i w rytmie zmieniających się pór roku. Pierwsze należą do wolnego, a drugie do szybkiego cyklu węglowego.

Z tego rozdziału dowiesz się, gdzie węgiel (pierwiastek) jest magazynowany na naszej planecie i jak krąży pomiędzy jej różnymi elementami – skałami, glebą, organizmami 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 skąd pochodzi dwutlenek węgla uwalniany 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 elementem w obiegu węgla jest ocean, który może pochłaniać z atmosfery duże ilości dwutlenku węgla (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, dowiesz się również, dlaczego stężenie tego gazu w atmosferze zmienia się w rytmie pór roku. Rozdział 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.

2.1. Węgiel na Ziemi

Węgiel to pierwiastek nieustannie krążący w przyrodzie

– pomiędzy atmosferą, biosferą, hydrosferą i litosferą.

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

ZAPAMIĘTAJ!

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

To właśnie o węglu pierwiastkowym mówimy w tym rozdziale.

Węgiel stanowi niecały promil masy Ziemi, a jednocześnie jest na niej wszechobecny. Nieustannie krąży pomiędzy atmosferą, zbiornikami wody, glebami, organizmami i skałami, zazwyczaj łącząc się z atomami innych pierwiastków. Większość węgla na Ziemi to tzw. **węgiel nieorganiczny**, czyli atomy węgla włączone w cząsteczki **węglanu wapnia** (CaCO_3) lub **dwutlenku węgla** (CO_2). Węglan wapnia wchodzi w skład skał wapiennych, a dwutlenek węgla występuje w wodzie i atmosferze. Związki te 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:



Około 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 odgrywa kluczową rolę w wymianie węgla pomiędzy różnymi jego rezerwuarami. To właśnie z niej pobierany jest dwutlenek węgla pochłaniany przez roślinność, oceany i zużywany 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 się znajdować duża ilość wybranej substancji. Rezerwuarami węgla są na przykład atmosfera (w której występuje 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 (np. 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

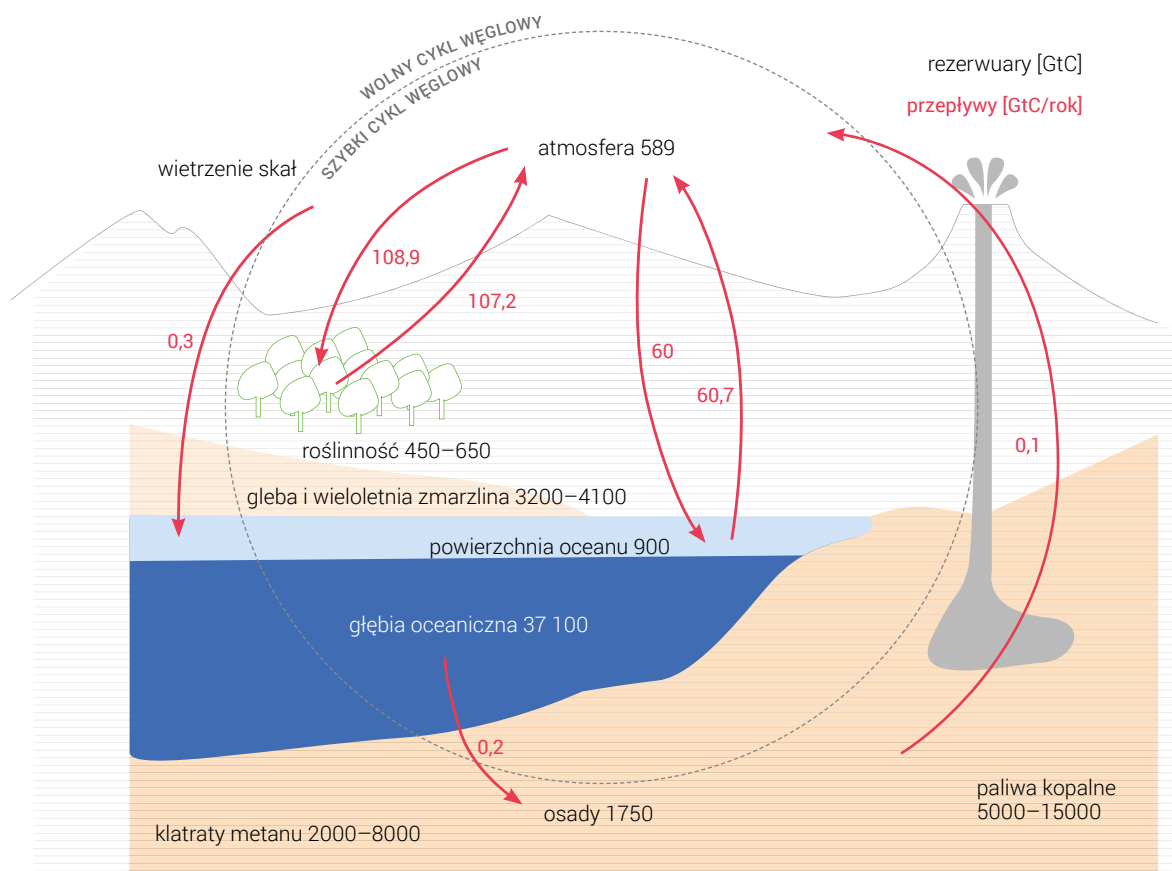
ppt (parts per trillion) liczba cząsteczek gazu śladowego w bilionie cząsteczek powietrza.

ZWRÓĆ UWAGĘ!

Masę węgla lub jego związków znajdujących się w jego rezerwuarach lub wymienianych pomiędzy nimi podaje się w różnych jednostkach. Mogą to być tony węgla (tC), ale także tony dwutlenku węgla (tCO_2) lub tony 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 (miliard) ton.

Klatraty metanu to powstające w niskich temperaturach kryształy zbudowane z cząsteczek wody i metanu. Na Ziemi znajdziemy je w głębi skał i w wieloletniej zmarzlinie 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.

Ilustracja 2.1.1. Uproszczony diagram obiegu węgla w przyrodzie w czasach przedprzemysłowych (przed 1750 rokiem), 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 prowadząca od 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 metanu praktycznie nie uczestniczą w szybkim cyklu węglowym.

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

Jak możesz zauważyć, przyglądając się podanym na diagramie liczbom dotyczącym przyływów węgla, niektóre procesy zachodzą w dużo większym tempie niż inne. Dlatego warto podzielić je na dwie klasy:

WOLNY CYKL WĘGLOWY/CYKL GEOLOGICZNY – procesy wymiany węgla, których skala czasowa jest długa (geologiczna), rzędu tysięcy, setek tysięcy i więcej lat.

DEFINICJA

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

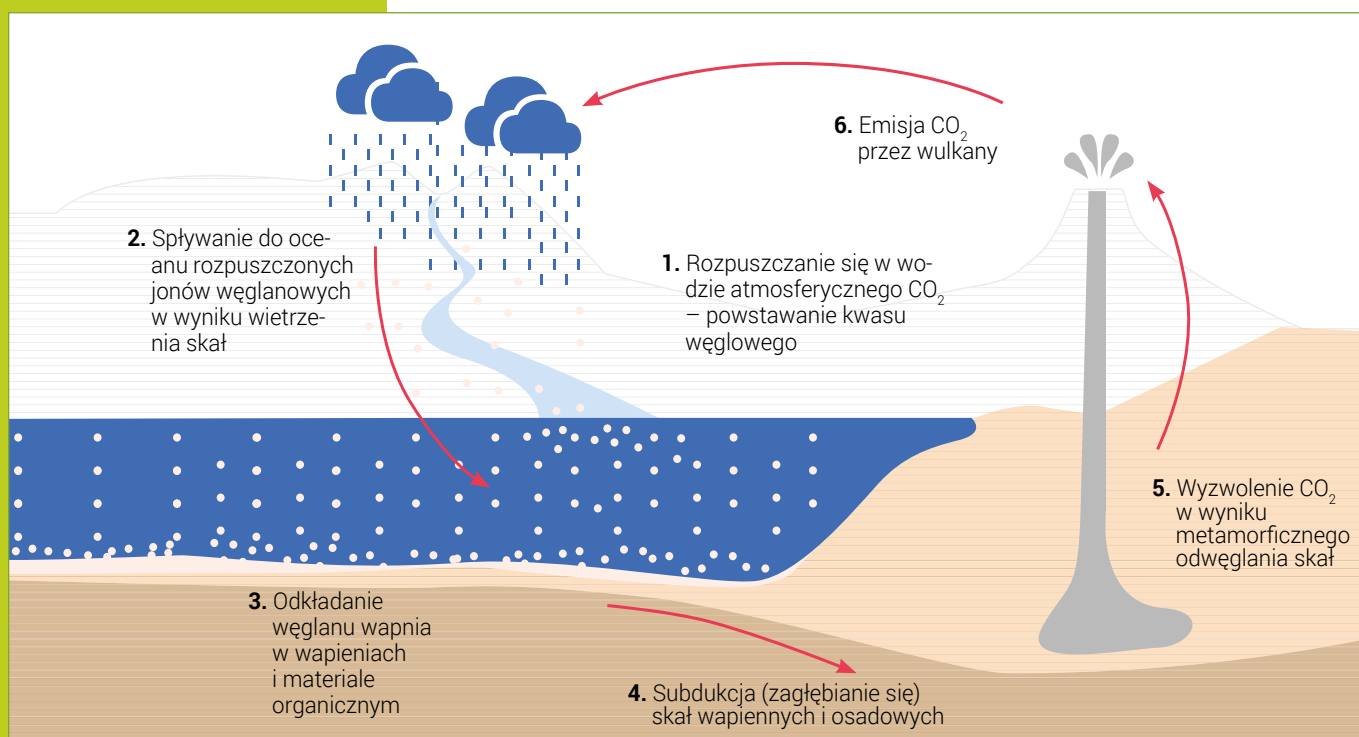
Szybki cykl węglowy obejmuje przede wszystkim wymianę węgla pomiędzy atmosferą, ekosystemami lądowymi (organizmami i glebą) oraz oceanami. Stale krąży tu ponad 40 000 GtC. Naturalne procesy zmieniają tę sumę bardzo powoli: zwróć uwagę, że przepływy między szybkim a wolnym cyklem węglowym (powstawanie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



2.2. Wolny cykl węglowy i termostat węglowy

Zjawiska składające się na wolny cykl węglowy – krążenie węgla związane z wietrzeniem skał, powstawaniem osadów morskich i wulkanizmem – regulują klimat Ziemi w geologicznych skalach czasowych.

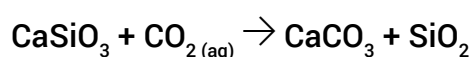
Być może wiesz już o tym, że jednym ze źródeł dwutlenku węgla znajdującego się w atmosferze są wulkany. Czy domyślasz się jednak, skąd bierze się on w gazach wulkanicznych? Przebywa długą i skomplikowaną drogę, która zaczyna się w atmosferze – przedstawiono ją w uproszczeniu na ilustracji 2.2.1.



Ilustracja 2.2.1.
Schemat wolnego cyklu węglowego.

WIETRZENIE SKAŁ

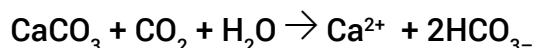
Dwutlenek węgla obecny w atmosferze rozpuszcza się w kropelkach wody tworzących chmury. Powstaje w ten sposób lekko kwaśny roztwór CO_{2(aq)}. Kiedy deszcz spada na skały zawierające krzemian wapnia (CaSiO₃), takie jak bazalty i granity (najpowszechniej występujące skały na Ziemi), dochodzi do ich wietrzenia 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.



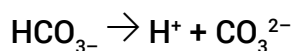
CHEMICZNE WIETRZENIE SKAŁ – zespół reakcji chemicznych powodujących rozkład skał może obejmować m.in. rozpuszczanie, utlenianie czy uwęglanowanie.

DEFINICJA

Skały wapienne również mogą podlegać **wietrzeniu chemicznemu**: w kontakcie z wodą i dwutlenkiem węgla uwalniają się wtedy jony wapniowe (Ca^{2+}) i wodorowęglanowe (HCO_3^-):



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

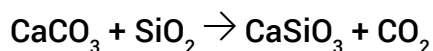


POWSTAWIANIE OSADÓW

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 muszli i szkieletów (przeczytasz o tym w kolejnym rozdziale). Gdy 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 przesuwają się względem siebie w skalach czasowych rzędu dziesiątek i setek milionów lat. W miejscach, gdzie płyty napierają na siebie, dochodzi do subdukcji – zagłębienia jednej pod drugą. W ten sposób warstwy osadów znajdujące się na dnie oceanicznym mogą wędrować w głąb Ziemi. Tam, 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 ilustracji 2.2.1. jako odwęglenie

Zauważ, że jest to reakcja odwrotna do tej związanej z wietrzeniem skał krzemionkowych.

Gdy przemieszczająca się pod ziemią magma trafia w pobliże jej powierzchni, podlega dużo mniejszemu ciśnieniu niż 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 to mieć związku z erupcjami wulkanicznymi.



Jak pamiętasz z podrozdziału 1.3., 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.

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 oraz trwającego miliony lat ich przekształcania w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury.

Powstawanie **ropy naftowej** także zaczyna się od powolnego gromadzenia (tym razem na dnie zbiorników wodnych) osadów organicznych, przekształcanych następnie przez bakterie; zachodzą wówczas również rozmaite reakcje chemiczne przebiegające w określonej temperaturze i pod odpowiednim ciśnieniem.

Gaz ziemny (składający się głównie z metanu) powstaje często przy okazji tworzenia się węgla lub ropy naftowej. Może też występować samodzielnie wytwarzany przez bakterie rozkładające materię organiczną na lądzie i w morzach lub uwalniany w wyniku przekształcania szczątków roślin i zwierząt pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia w głębi ziemi.

Jeżeli tylko w wyniku zjawisk takich jak ruchy tektoniczne nie dojdzie na przykład do rozszczelnienia złoża gazu ziemnego i ulotnienia się go do atmosfery, to węgiel pierwiastkowy odłożony w złożach geologicznych nie bierze udziału w obiegu węgla, jest w nich „unieruchomiony”. Naturalne procesy regulujące wymianę węgla pomiędzy rezerwuarami (opisane w tym i kolejnych rozdziałach) zachodzą w tempie dopasowanym do tej sytuacji. Większość złóż paliw na Ziemi powstała setki czy dziesiątki milionów lat temu z osadów odkładających się w ciągu milionów lat.

TERMOSTAT WĘGLOWY

Opisane procesy tworzą zamkniętą pętlę, w której dwutlenek węgla jest jednocześnie wprowadzany do atmosfery i z niej usuwany 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, co 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 w powietrzu. Te dwa procesy mogłyby spowodować ocieplenie na tyle duże, że doprowadziłoby do wyparowania wszystkich zbiorników i utraty wody przez Ziemię.

Na szczęście wystąpienie tych skrajnych scenariuszy jest mało prawdopodobne dlatego, że działanie wolnego cyklu węglowego jest regulowane silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym – mechanizmem nazywanym **termostatem węglowym** (ilustracja 2.2.2.).

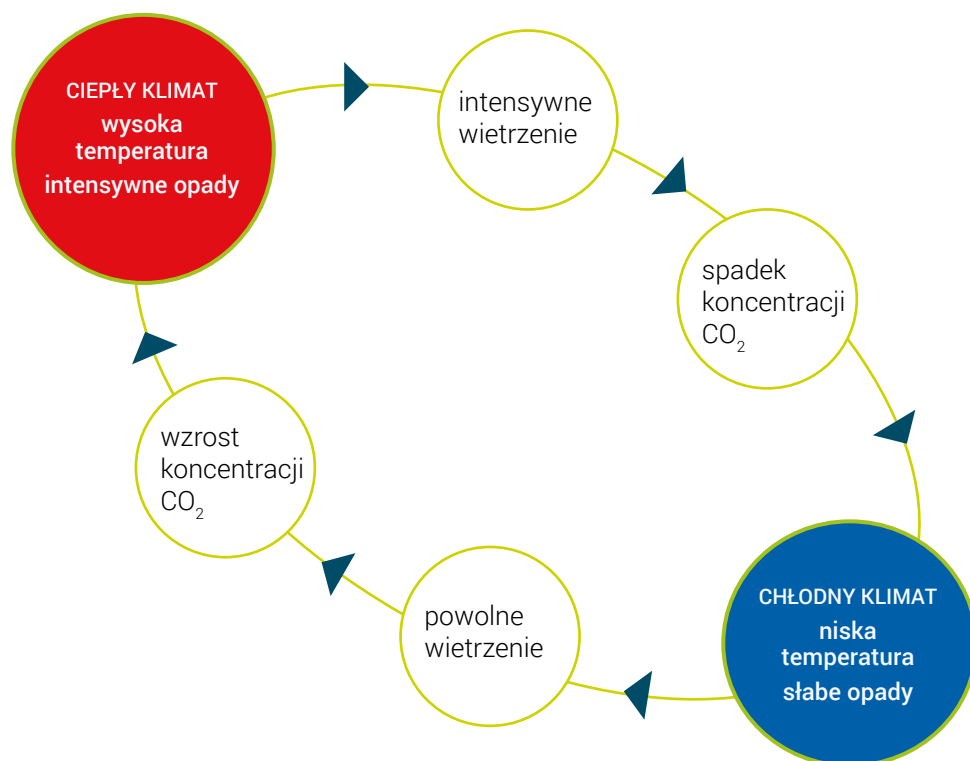


Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Para wodna
– klimatyczny dopalacz



NAUKA O KLIMACIE
DLA ŚCISŁOPROZNYCH



Ilustracja 2.2.2. Schemat termostatu węglowego.

Emisje wulkaniczne są praktycznie niezależne od aktualnego stanu klimatu, inaczej jest jednak z wietrzeniem skał. Wydajność opisanych procesów pozostaje ściśle związana z temperaturą i zawartością wody w atmosferze: nasilają się one przy wysokiej temperaturze i intensywnych opadach (charakterystycznych dla ciepłego klimatu), a słabną w niskiej temperaturze i przy słabych opadach (charakterystycznych dla chłodnego klimatu).

Kiedy 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.

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

świeżo wypiętrzone łańcuchy górskie ulegają wietrzeniu znacznie szybciej niż równina pokryta grubą warstwą gleby chroniącej krzemiany 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), na dużej jego części opady występują sporadycznie, 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 historię klimatu Ziemi.



2.3. Węgiel w oceanach

Ilość dwutlenku węgla w powierzchniowej warstwie oceanu zależy od ilości tego związku w 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), to także wielki rezerwuár węgla – wielokrotnie większy niż atmosfera. Może pochłaniać dwutlenek węgla z powietrza, uwalniać go i – dzięki prądom morskim – rozprowadzać po świecie. W oceanie zachodzą procesy o różnych skalach czasowych – zarówno te należące do wolnego cyklu węglowego (tworzenie osadów morskich, o których pisaliśmy w poprzednim podrozdziale), jak i zachodzące stosunkowo szybko (wymiana cząsteczek CO_2 z atmosferą).

Spośród niemal 40 000 GtC zgromadzonych w oceanie, jedynie ok. 3 GtC jest zmagazynowanych 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, na przykład 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 podrozdziale o wolnym cyklu węglowym);
- jest pobierany z atmosfery na drodze fotosyntezy przez unoszący się na powierzchni oceanu plankton, a następnie wykorzystywany przez wchodzące w jego skład oraz 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 kolejne reakcje.

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

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



Jeśli chcesz dokładniej zrozumieć te zagadnienia, zajrzyj do artykułów na stronie www.naukaoklimacie.pl

Szybki cykl węglowy, część 2: węgiel w oceanach

Mit: Zakwaszanie oceanu nie szkodzi morskim stworzeniom

Mit: Wzrost emisji CO_2 nie ma wpływu na oceany



NAUKA O KLIMACIE
DLA SPOŁECZEŃSTWA

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).

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Globalne ocieplenie, prądy morskie i życie w oceanach

Klimat: przeszłość, teraźniejszość, przyszłość



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. Na przykład 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. Tam 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 epok lodowych zapoczątkowanych przez zmiany nasłonecznienia bieguna północnego i występujących między nimi ociepleń klimatu.

Skład chemiczny i temperatura powierzchniowej warstwy oceanu (do głębokości ok. 100 metrów) są w przybliżeniu jednorodne, ponieważ warstwa ta podlega stałemu mieszaniu przez wzbudzający fale wiatr. **Ciśnienie cząstkowe CO_2 w tej warstwie dąży do równowagi z ciśnieniem cząstkowym CO_2 w atmosferze.** Choć 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.

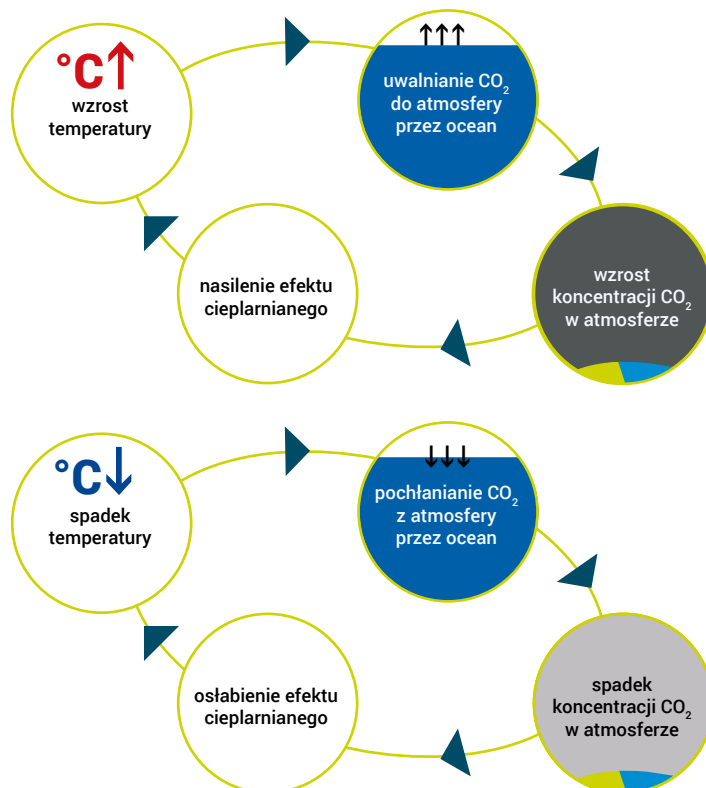
Dwutlenek węgla jest jednocześnie pochłaniany i uwalniany przez ocean. W warunkach stabilnego klimatu i stałej ilości węgla krążącej w przyrodzie procesy te się równoważą.

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:

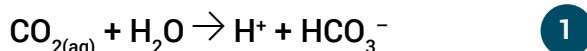


Ilustracja 2.3.1. Schemat sprzężenia klimatycznego związanego z rozpuszczalnością dwutlenku węgla w oceanie. Na górze reakcja systemu klimatycznego na wzrost, a na dole na spadek temperatury i koncentracji dwutlenku węgla.

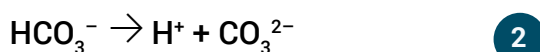
Co się dzieje...

● kiedy CO₂ trafia do oceanu...

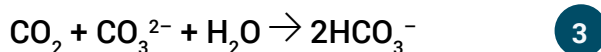
Jeśli cząsteczki dwutlenku węgla znajdują się pomiędzy cząsteczkami wody, reagują z nimi, tworząc nietrwałe cząsteczki kwasu węglowego (H₂CO₃), niemal natychmiast rozpadające się na jony wodorowe i wodorowęglanowe:



Jony wodorowęglanowe powstające w wyniku tych reakcji albo wietrzenia skał mogą też się rozpadać, tworząc jony węglanowe (CO₃²⁻):



Jony węglanowe łączą się z dwutlenkiem węgla i wodą, dając kolejne jony wodorowęglanowe:



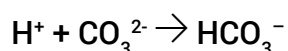
Zauważ, że mamy tu kolejne reakcje, w wyniku których z roztworu znikają cząsteczki CO₂, a pojawiają się jony wodorowęglanowe. To oznacza, że w mieszaninie „robi się miejsce” na przyjęcie następnych cząsteczek dwutlenku węgla z atmosfery. Zachowanie równowagi ciśnień parcyjnych między atmosferą i oceanem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

● kiedy w atmosferze przybywa CO₂...

Dopóki wzrost średniej temperatury jest umiarkowany, dopóty reakcje zachodzące w oceanie mogą stanowić dobry mechanizm stabilizujący klimat i usuwający z atmosfery 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, przeważnie dziesiątek lat.

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**

UWAGA!

Wymienione obok reakcje zachodzą w roztworze cały czas i w obie strony. To, który kierunek reakcji jest bardziej prawdopodobny (częstszy), zależy od dostępności składników, temperatury i innych aktualnie panujących warunków.

CZY WIESZ, ŻE ?

Powstające wolne jony wodorowe natychmiast łączą się z cząsteczkami wody, tworząc jony hydroniowe H₃O⁺.

DEFINICJA

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

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 np. różnice między wodą słodką i słoną) i temperatury.

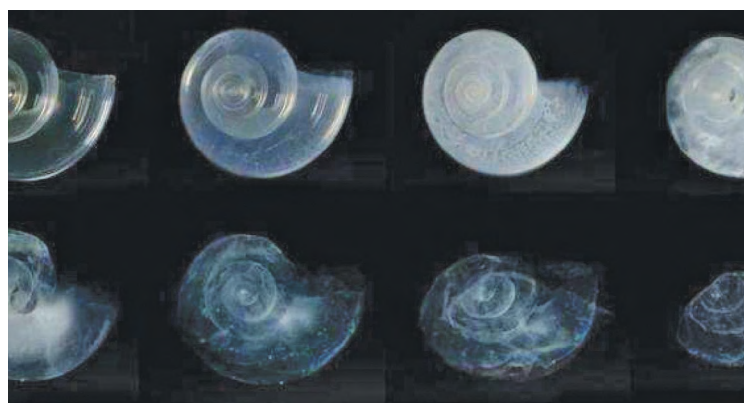
Roztwór nienasycony to taki, w którym zawartość soli jest mniejsza od progu rozpuszczalności – jeśli dodamy do niego kolejne porcje soli, zostaną one rozpuszczone.

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.

DLACZEGO NIEDOBÓR JONÓW WĘGLANOWYCH STANOWI PROBLEM?

Jak już wiesz z podrozdziału 2.2. o wolnym cyklu węglowym, wiele organizmów morskich – takich jak otwornice, mięczaki czy koralowce – pobiera z wody jony wapniowe i węglanowe, by budować z nich swoje muszle i 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 żyjące w nich organizmy. Jeśli jednak stężenie CO_2 w powietrzu szybko rośnie (tak jak dzieje się obecnie), w wodzie morskiej zaczyna ubywać jonów węglanowych i budowanie muszli staje się coraz trudniejsze. W skrajnych przypadkach, gdy roztwór węglanu wapnia stanie się nienasycony, może to prowadzić wręcz do rozpuszczania muszli żyjących organizmów (ilustracja 2.3.2.).



Ilustracja 2.3.2. Kolejne, wykonywane co kilka dni, zdjęcia skorupki umieszczonej w wodzie o pH 7,8 (przewidywanym na koniec XX wieku). Między pierwszym a ostatnim zdjęciem upłynęło 45 dni.

Źródło: NOAA Environmental Visualization Laboratory.

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

— CZY WIESZ, ŻE ?

Drobne organizmy morskie stanowią podstawę morskich łańcuchów pokarmowych. Spadek ich populacji oznacza brak pożywienia dla większych organizmów i może przyczynić się do przebudowy całych morskich ekosystemów, a także czerpiących z ich dobrodziejstwa społeczności zajmujących się rybołówstwem.

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

2.4. 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 jego przepływ 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 – w geologicznej skali czasowej powstaną z nich pokłady torfu, a potem węgla brunatnego i kamiennego.

WĘGIEL GROMADZI SIĘ W EKOSYSTEMACH

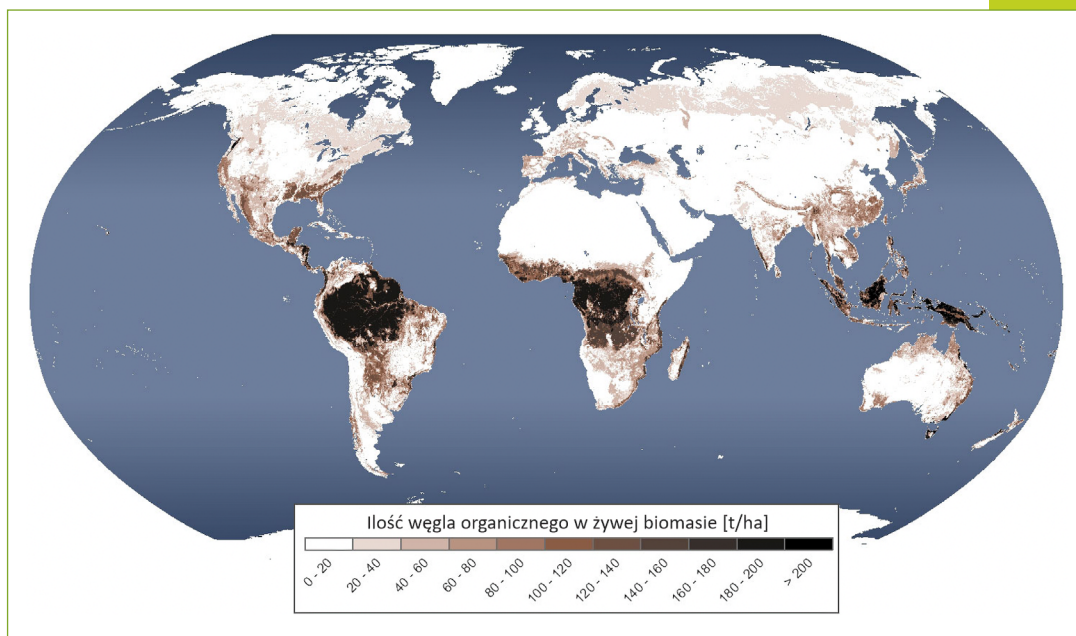
Węgiel krążący w biosferze jest pobierany z atmosfery przez rośliny, a następnie, po połączeniu z innymi pierwiastkami, stanowi budulec ich organizmów oraz istot, które się nimi żywią. Najwięcej węgla zmagazynowanego w organizmach żywych znajdziemy w rejonie lasów deszczowych, które swoją wyjątkową bujność zawdzięczają łatwemu (i całorocznemu) dostępowi do dużej ilości energii słonecznej oraz wody (ilustracja 2.4.1.).

Zwiększenie dostępności dwutlenku węgla może ułatwiać roślinom wzrost i przyczyniać się do zwiększania ich masy. Jest to jednak efekt ograniczony, ponieważ oprócz CO₂ rośliny potrzebują także innych składników odżywczych, wody oraz sprzyjających warunków oświetleniowych i klimatycznych. Ich niedostatek ogranicza możliwości wykorzystania nadmiaru dwutlenku węgla.

Torf – masa organiczna składająca się z niecałkowicie rozłożonych szczątków roślin.

CZY WIESZ, ŻE ?

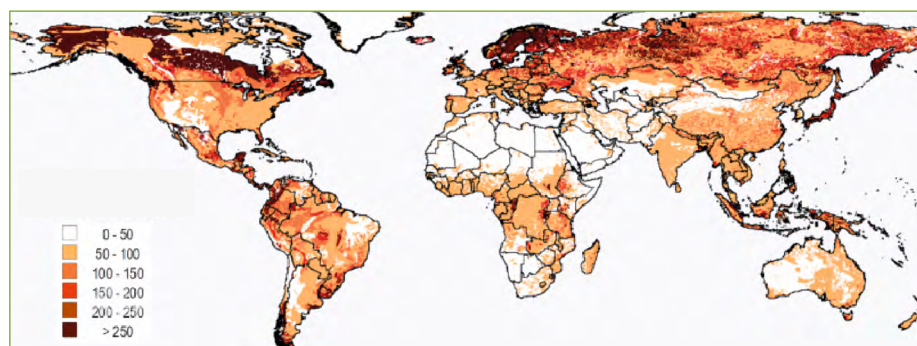
W latach 2009–2018 ekosystemy lądowe (roślinność i gleby) pochłonięły ok. 29% dwutlenku węgla wyemitowanego w tym czasie w wyniku działalności człowieka (Friedlingstein i in., 2019).



Ilustracja 2.4.1. Ilość węgla organicznego w żywych organizmach zarówno na powierzchni ziemi, jak i w glebie.

Źródło: Reusch 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), co przedstawiono na ilustracji 2.4.2. Niemal 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.



Ilustracja 2.4.2. Ilość węgla organicznego w glebach do głębokości 1 metra (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 ilości węgla w atmosferze, a być może nawet ją przekraczającego. 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, zajmują bowiem 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

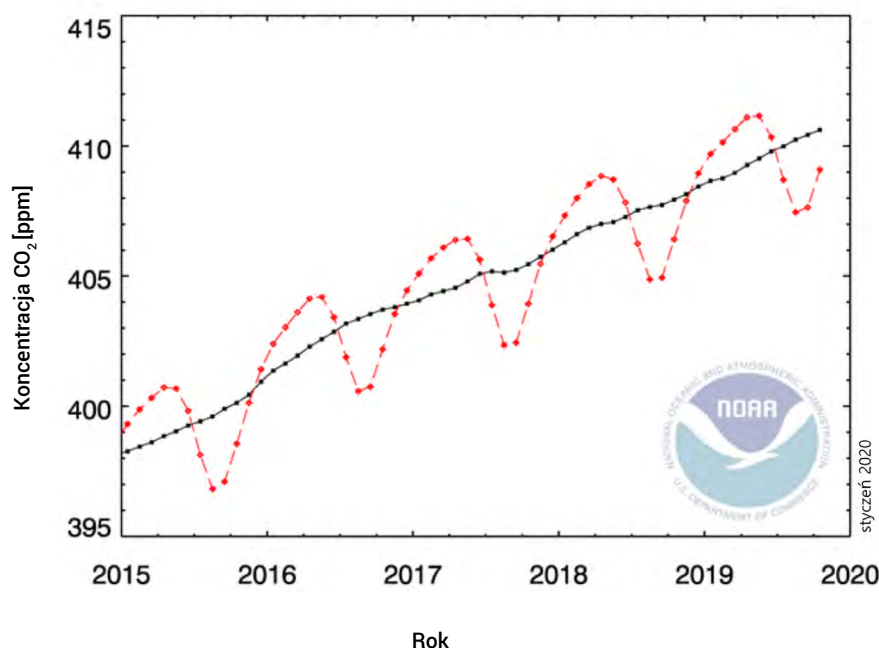
Jak już wiesz, gdy rośliny pobierają dwutlenek węgla z atmosfery, przekształcają go na drodze fotosyntezy w węglowodany. W tym procesie węgiel podwyższa swój stan energetyczny – można porównać to do ładowania baterii. Zamknięty w węglowodanach zapas energii może być następnie wykorzystany

przez samą roślinę lub zwierzę, które ją zje. W procesie **oddychania** cząsteczki organiczne łączą się z tlenem, co prowadzi do uwolnienia energii i powstania 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 do atmosfery węgla znajdującego się w roślinach są **pożary**. Również tu (o ile klimat jest stabilny i nie zachodzą inne zaburzenia) mamy jednak 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). Procesy fotosyntezy wówczas wyhamowują, a dodatkowo z rozkładającej się martwej materii organicznej uwalnia się węgiel. W rezultacie stężenie dwutlenku węgla w powietrzu rośnie. Globalna średnia koncentracja CO₂ zmienia się zgodnie z rytmem pór roku na półkuli północnej, ponieważ powierzchnia lądów i masa roślinności sezonowej są tam większe niż na półkuli południowej (ilustracja 2.4.3.).



Ilustracja 2.4.3. Koncentracje dwutlenku węgla obserwowane na Mauna Loa na Hawajach. Na czerwono zaznaczono średnie miesięczne, na czarno wyniki pomiarów po usunięciu rocznych cykli.

Źródło: NOAA.

Aktualne dane z pomiarów na Mauna Loa znajdziesz na stronie internetowej Global Monitoring Laboratory National Oceanic and Atmospheric Administration (GML NOAA): <https://www.noaa.gov>

W warunkach stabilnego klimatu i braku ingerencji w ekosystemy lądowe ilość zgromadzonego w nich węgla jest w przybliżeniu stała: dopływy i straty węgla równoważą się w ciągu roku. Obecnie, w związku z działalnością człowieka, średnia koncentracja CO₂ w powietrzu rośnie, w wynikach pomiarów wciąż jednak wyraźnie widoczne są wahania związane z cyklem rocznym.

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



Więcej o zmianach zasięgu roślinności prowadzącej fotosyntezę w cyklu rocznym oraz koncentracji CO₂ w różnych częściach świata: <https://svs.gsfc.nasa.gov/>



- **Na terenie pozbawionym wcześniej roślin zaczyna rozwijać się las.** Stopniowo, w ciągu 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 ulegają rozkładowi po dłuższym czasie).

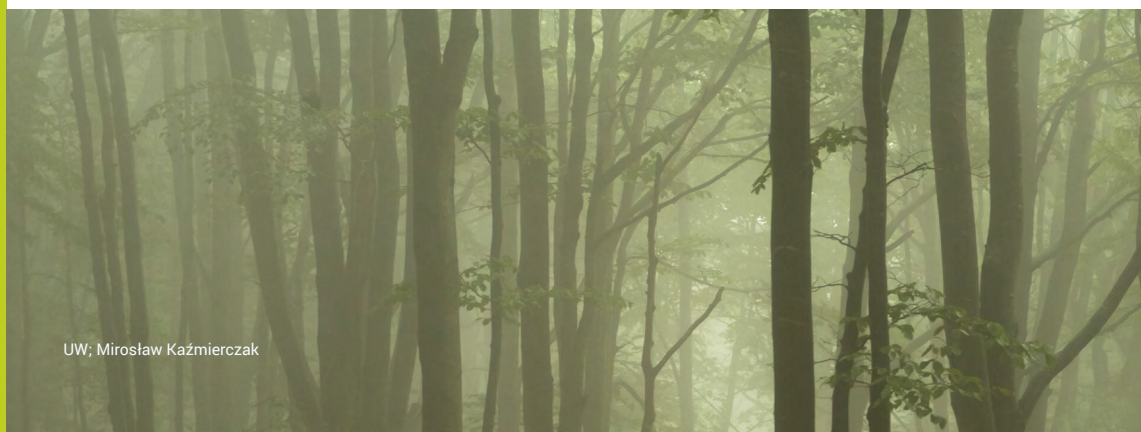
Usunięcie drzew i zniszczenie podszycia prowadzi do odsłonięcia gleb i ułatwienia ich erozji, a co za tym idzie – dalszych emisji dwutlenku węgla. Proces ten jest szczególnie intensywny zaraz po wylesieniu, jednak może trwać przez kolejne dziesięciolecia.

- **Na terenie, z którego został usunięty las tropikalny, człowiek zakłada plantację eukaliptusa lub palmy olejowej.** Nowe rośliny, rosnąc, pobierają dwutlenek węgla z atmosfery. W porównaniu jednak z lasem naturalnym plantacja jest dużo mniej pojemnym magazynem węgla, znajdziemy na niej bowiem mniej gatunków i pięter roślinności. Pochłanianie przez nią CO₂ z atmosfery nie rekompensuje strat w ilości węgla związanego przez pierwotny ekosystem spowodowanych jego zniszczeniem.

CZY WIESZ, ŻE ?

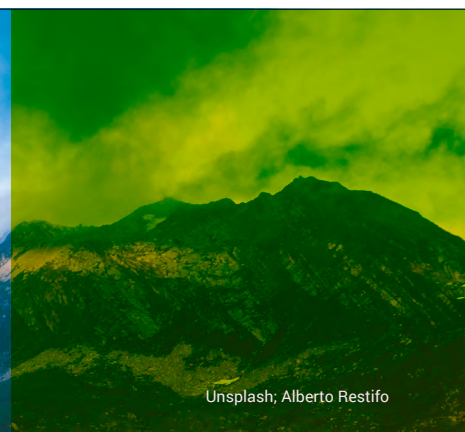
Zamiana lasów na grunty rolnicze była do połowy XX wieku głównym źródłem emisji dwutlenku węgla do atmosfery i wciąż odpowiada za ok. 10% naszych aktualnych emisji.

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 ok. 2 Gt CO₂ rocznie, a więc ilość odpowiadającą 5% pozostałych antropogenicznych emisji.



2.5. Impuls węglowy i jego usuwanie z atmosfery

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



Unsplash; Alberto Restifo

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 oraz w procesie wietrzenia skał. Jeśli wprowadzimy do niej dużą ilość dwutlenku węgla (np. 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 będą obejmować wiele procesów przyrodniczych.

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

W CIĄGU PIERWSZYCH LAT I DEKAD...

Wzrost dostępności dwutlenku węgla w atmosferze spowoduje szybszy wzrost roślin (przyrost ich masy), a pochodząca z nich martwa materia organiczna naturalnie będzie 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 . Szybki wzrost ilości dwutlenku węgla w wodzie może prowadzić do niedoboru jonów węglanowych i rozpuszczania muszli 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 powoduje wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, a więc i przyspieszenie rozkładu materii organicznej w glebach. Związane z tym emisje równoważą pochłanianie dwutlenku węgla przez roślinność, ekosystemy przestają więc pochłaniać jego nadwyżkę 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.

Jednocześnie cyrkulacja oceaniczna przenosi rozpuszczający się w wodach powierzchniowych dwutlenek węgla 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 dociera do coraz głębszych warstw oceanu i rozpuszcza osady dennie składające się z węglanu wapnia (CaCO_3).

W tej skali czasowej na znaczeniu zyskuje proces wietrzenia skał wapiennych. Znajdujący się w nich węglan wapnia (CaCO_3) wchodzi w reakcje z nasyconą dwutlenkiem węgla 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.

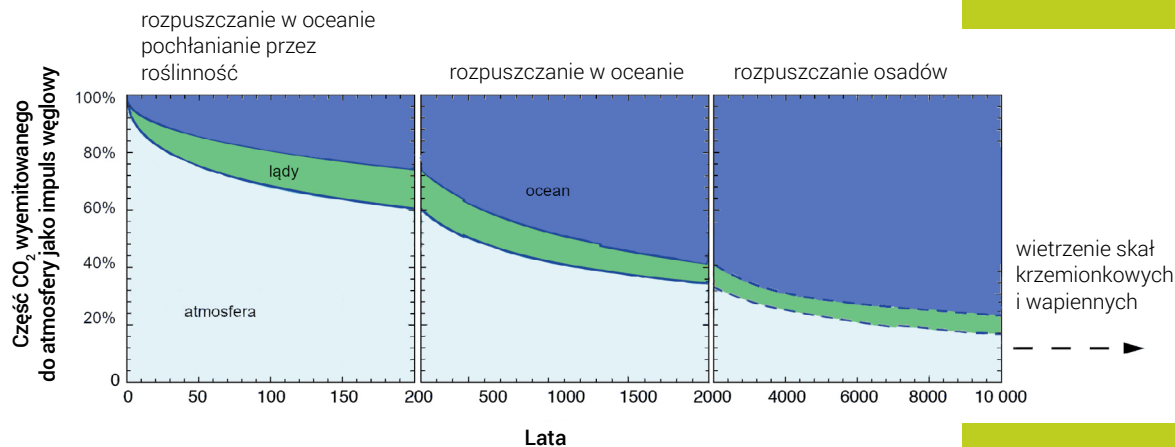
W stabilnych warunkach procesy dostarczające do oceanów węglan wapnia są równoważone przez procesy odkładania go w osadach oceanicznych. Kiedy jednak wzrost koncentracji CO_2 jest szybki, zakwaszaniu wody towarzyszy niedobór jonów węglanowych, który spowalnia powstawanie osadów albo wręcz powoduje ich rozpuszczanie. W rezultacie 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 w oceanie wraz z zawartymi w niej organizmami pozwala na rozproszczenie w nim węglanu wapnia i zniesienie zakwaszenia.



Ilustracja 2.5.1. 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 CO₂ wciąż jeszcze znajduje się w atmosferze. W tym czasie kończą się możliwości przyrostu masy roślin – zauważ, że ten rezeruar 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 i powolnym procesom zachodzącym w oceanach, ilość dwutlenku węgla w atmosferze ma szansę na powrót do stanu sprzed impulsu węglowego.

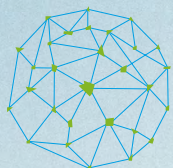
LICZY SIĘ SUMA EMISJI!

Jak widzisz, do wycofania dużej ilości węgla z atmosfery w szybkim cyklu węglowym potrzeba nawet setek tysięcy lat. Gdy operujemy tak długimi skalami czasowymi, nie ma wielkiego znaczenia, czy 2400 GtC uwalnialiśmy do atmosfery w ciągu 250 czy kilku lat – czas pozostawania nadwyżki CO₂ w atmosferze będzie i tak dużo dłuższy. Dla ostatecznej wielkości zmiany klimatu liczy się więc przede wszystkim to, ile CO₂ wyemitujemy łącznie.

CZY WIESZ, ŻE ?

Fakt, że wycofanie z atmosfery dużego impulsu węglowego wymaga bardzo długiego czasu, ułatwia nam badanie przeszłości klimatu Ziemi. Nawet jeśli dane pochodzące z próbek geologicznych mają małą rozdzielczość (tzn. dają nam informacje o stu- czy tysiącletnich średnich temperaturach lub składzie atmosfery) i moglibyśmy przeoczyć nagły wzrost koncentracji CO₂ trwający na przykład 50 lat, to nie przeoczymy długiego okresu pozbywania się nadwyżki dwutlenku węgla przez atmosferę.

II. PRZYCZYNY



KLIMATYCZNE
ABC

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997

Uniwersytet Warszawski

3. 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 działalnością człowieka) emisje gazów cieplarnianych mogą wydawać się niewielkie. W ciągu roku wprowadzamy do atmosfery na przykład ok. 20 razy mniej CO_2 niż źródła naturalne (Ciais i in., 2013). W przeciwieństwie jednak 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 rezultacie 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 rozmaite zaburzenia (np. wspomniane w rozdziale 2. zakwaszanie oceanu). Freony i inne syntetyzowane przez człowieka gazy techniczne stanowią zupełnie nowe składniki atmosfery.

Z tego rozdziału dowiesz się, jakie procesy związane z ludzką działalnością 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 i transportem).

3.1. Antropogeniczne emisje dwutlenku węgla

Człowiek przyczynia się do emisji dwutlenku węgla do atmosfery przede wszystkim poprzez spalanie paliw kopalnych – proces, 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 – wydobywane z głębi ziemi surowce zawierające węgiel, które w wyniku spalania (łączenia atomów węgla z atomami tlenu) uwalniają energię. Do paliw kopalnych zaliczamy węgiel brunatny i kamienny, ropę naftową i gaz ziemny (składający się głównie z metanu).

DEFINICJA

Podczas spalania paliw kopalnych 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 miały 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 już wiesz z rozdziału 2., jego usunięcie z atmosfery w wyniku procesów naturalnych 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 podręczniku pozostajemy przy tym określeniu.

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:

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

masa atomu węgla masa atomu tlenu

Zwiększanie koncentracji gazów cieplarnianych powoduje wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, co przynosi wiele negatywnych skutków dla przyrody i ludzkiej populacji. Mimo to od czasu rewolucji przemysłowej zużycie paliw kopalnych oraz związane z nim emisje gazów cieplarnianych niemal stale rosły (dlaczego tak się działo, wyjaśnimy dokładniej w kolejnym podrozdziale). Obecnie spalanie węgla, ropy i gazu odpowiada za ponad 80% całkowitych emisji dwutlenku węgla wynikających z działalności człowieka (Friedlingstein i in., 2022).

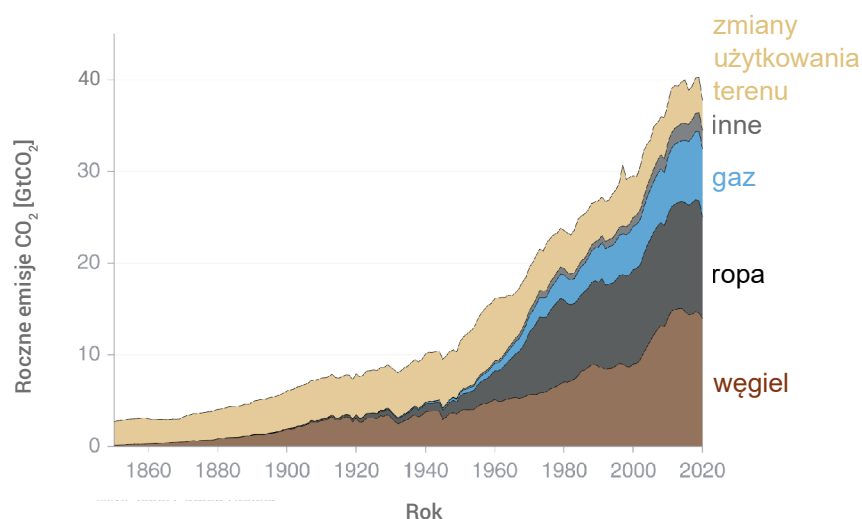
DEFINICJA

REWOLUCJA PRZEMYSŁOWA – całość zmian technicznych i ekonomicznych, które wiązały się z przejściem od wytwarzania dóbr w warsztatach czy manufakturach do coraz bardziej masowej i zautomatyzowanej produkcji fabrycznej. Przebiegała od połowy XVIII do połowy XIX wieku.

Unsplash; Adam Bignell

Ilustracja 3.1.1. Roczne emisje dwutlenku węgla (w gigatonach CO_2) powstałe w wyniku spalania węgla, ropy i gazu, a także zmian użytkowania terenu oraz pochodzące z innych źródeł (głównie produkcji cementu).

Źródło: Global Carbon Project, 2021.



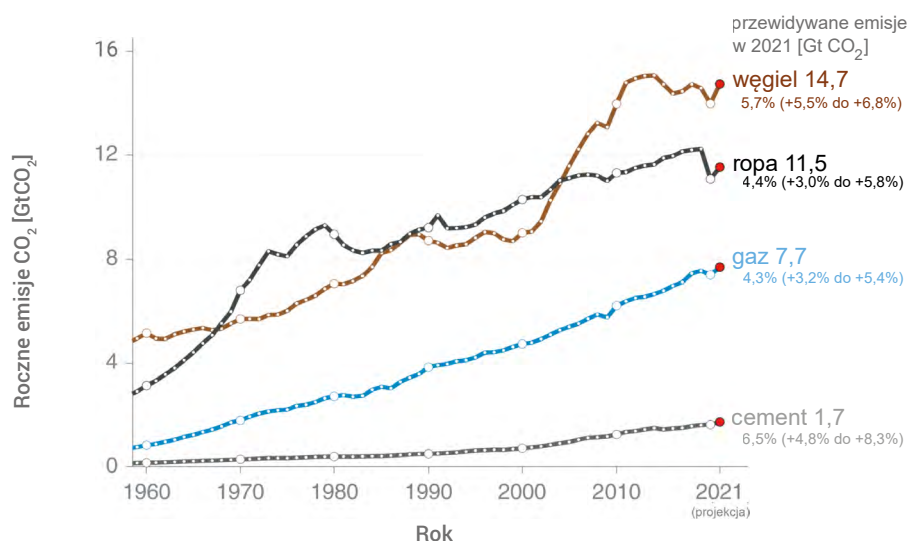
W roku 2020, w czasie którego wiele sektorów gospodarki doświadczyło ograniczeń związanych z pandemią COVID-19, całkowite emisje dwutlenku węgla związane ze spalaniem paliw kopalnych wyniosły ok. 32,5 GtCO₂ (ok. 14 GtCO₂ z węgla, ok. 11,1 GtCO₂ z ropy, ok. 7,4 GtCO₂ z gazu). Jednak już rok później (w 2021 r.) wróciły do poziomu sprzed pandemii, sięgając prawdopodobnie 33,9 GtCO₂ (14,7 GtCO₂ z węgla, 11,5 GtCO₂ z ropy, 7,7 GtCO₂ z gazu) (Friedlingstein i in., 2022).

ZWRÓĆ UWAGĘ!

W poszczególnych paliwach kopalnych (węglu, ropie, gazie) węgiel pierwiastkowy ukryty jest w cząsteczkach różnych związków chemicznych (mających różne zestawy wiązań magazynujących energię). Dlatego wyprodukowanie tej samej ilości energii z ich użyciem jest źródłem różnych emisji dwutlenku węgla.

Tabela 3.1.1. 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 produkty pochodne)	50–62
Paliwa na bazie ropy naftowej (ropa, nafta, benzyna itp.)	69–75
Węgiel (różne klasy)	79–110



Wraz z danymi dotyczącymi emisji gazów pochodzących ze spalania paliw kopalnych prezentuje się często także dane dotyczące gazów uwalnianych podczas produkcji cementu. Proces ten polega na wyprażaniu skał wapiennych zawierających węglan wapnia (CaCO₃) w wysokiej temperaturze w celu wytworzenia tak zwanego wapna palonego (CaO). W wyniku tej reakcji ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) emitowany jest dwutlenek węgla.

Jest to inny proces (reakcja chemiczna) niż spalanie paliw kopalnych, jednak 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). Co więcej, temperaturę odpowiednią do wyprażania skał uzyskuje się, 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.).

Ilustracja 3.1.2. 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 2021 roku oraz informacje o ich zmianie względem poprzedniego roku (procentowy wzrost lub spadek). Ilustracja pochodzi z raportu opublikowanego pod koniec 2021 roku, kiedy ostateczne dane dla tego roku nie były jeszcze znane.

Źródło: Global Carbon Project, 2021.

CZY WIESZ, ŻE ?

Gdy spalamy paliwa, oprócz dwutlenku węgla może powstawać i być uwalnianą do atmosfery także sadza – drobne cząstki stałe składające się z węgla pierwiastkowego oraz różnych zawierających węgiel związków i resztek spalanego materiału. Te cząstki pochłaniają promieniowanie słoneczne i mogą przyczynić 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.

W wyniku tych procesów węgiel powraca do atmosfery przede wszystkim w postaci dwutlenku węgla.

ZMIANY UŻYTKOWANIA TERENU

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

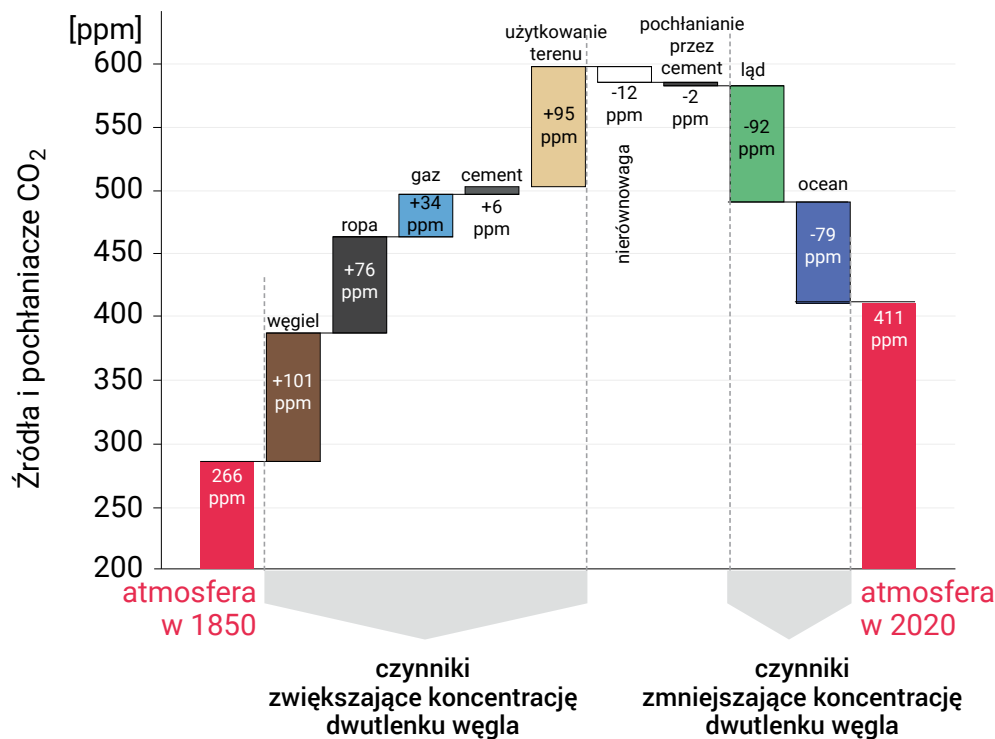
- **z likwidacją rezerwuaru węgla, jaki stanowią żyjące rośliny,** które:
 - zostają od razu lub prawie od razu spalone,
 - są przetwarzane na produkty – meble, włókna, papier itd., które ostatecznie również w ciągu kilku lub kilkunastu, najdalej kilkudziesięciu lat zostaną spalone lub wyrzucone,
 - ulegają rozkładowi przez mikroorganizmy;
- **z odsłonięciem gleby i wystawieniem jej 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 rozwój bakterii tlenowych, rozkładających szczątki organiczne i emitujących dwutlenek węgla.

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

Jak widać na ilustracji 3.1.1., emisje dwutlenku węgla wynikające ze zmian użytkowania terenu od połowy XIX wieku utrzymują się na poziomie kilku gigaton CO_2 rocznie.

CO SIĘ DZIEJE Z WYEMITOWANYM PRZEZ NAS CO_2 ?

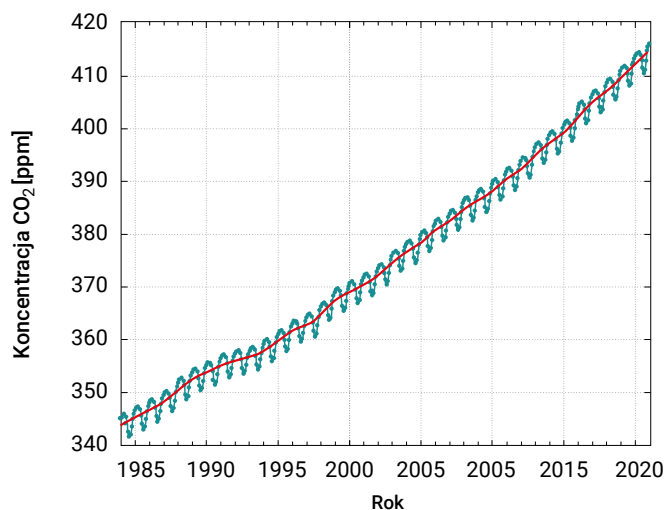
Przed rozpoczęciem epoki przemysłowej koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze przez setki tysięcy lat utrzymywała się na poziomie poniżej 300 ppm. W latach 1850–2019 człowiek wyemitował do atmosfery w sumie 1649 GtCO_2 w wyniku spalania paliw kopalnych i produkcji cementu oraz 751 GtCO_2 przez zmiany użytkowania terenu (ilustracja 3.1.3.). W sumie $2400 \pm 238 \text{ GtCO}_2$ dołączyło do szybkiego cyklu węglowego: $586 \pm 73 \text{ GtCO}_2$ trafiło do oceanu, $733 \pm 147 \text{ GtCO}_2$ zostało pochłonięte przez ekosystemy lądowe, a w atmosferze pozostało $953 \pm 18 \text{ GtCO}_2$ (Friedlingstein i in., 2019).



Ilustracja 3.1.3. Udział poszczególnych źródeł dwutlenku węgla związanych z działalnością człowieka we wzroście koncentracji CO₂ w atmosferze oraz wkład pochłaniających go ekosystemów lądowych i oceanu w jej obniżenie.

Źródło: Global Carbon Project, 2021.

Od czasu rewolucji przemysłowej koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze stale rośnie, od roku 1750 wzrosła już o 49%. W roku 2020 wyniosła 413,2±0,2 ppm (World Meteorological Organization, 2021). Jak widać na ilustracji 3.1.4., tempo wzrostu koncentracji CO₂ przekracza obecnie 2 ppm/rok.



Ilustracja 3.1.4. Zmiany koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze (w cząstkach na milion). Niebieskie kropki odpowiadają średnim miesięcznym, czerwona linia pokazuje średnie miesięczne po zniwelowaniu wahań związanych ze zmianami pór roku.

Źródło: World Meteorological Organization, 2021.

3.2. Antropogeniczne emisje innych gazów cieplarnianych

Chociaż emisje i koncentracje gazów cieplarnianych innych niż dwutlenek węgla są dużo niższe, one również mają znaczenie dla klimatu.

Im mniejsze stężenie konkretnego składnika atmosfery, tym łatwiej je istotnie zmienić.

Dwutlenek węgla nie jest jedynym gazem cieplarnianym wprowadzanym do atmosfery w wyniku działalności 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 znacznie 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 są one zupełnie nowymi, wytworzonymi przez człowieka składnikami atmosfery.

Warto pamiętać, że w językach 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

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

Gazy cieplarniane, które mają duże koncentracje w atmosferze (CO₂, para wodna), pochłaniają już dużą część dostępnego dla siebie promieniowania. Dodawanie ich do atmosfery 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.

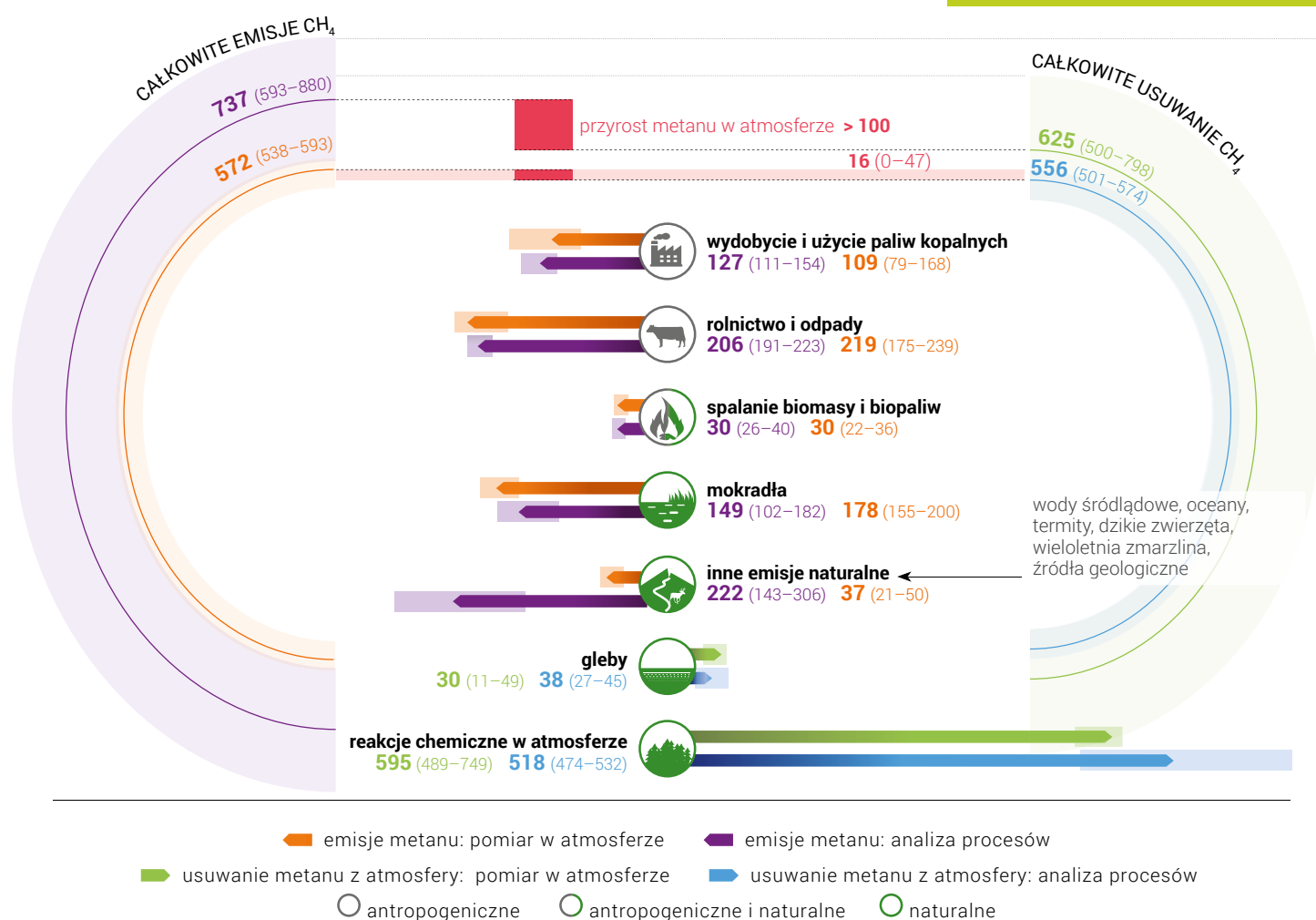
METAN

Problem metanu przewijał się już w naszym podręczniku. To gaz, którego cząsteczki składają się z jednego atomu węgla i czterech atomów wodoru (ma wzór chemiczny CH₄ i masę cząsteczkową 16u). Jego „czas życia” w powietrzu jest dużo krótszy niż CO₂: w ciągu ok. 10 lat uwolnione do atmosfery cząsteczki metanu utleniają się, w wyniku czego powstaje dwutlenek węgla, który następnie uczestniczy w procesach cyklu węglowego, znanych z rozdziału 2. Średnia koncentracja metanu wyniosła w 2020 roku 1889 ± 2 ppb, czyli o 162% więcej niż przed rewolucją przemysłową (World Meteorological Organization, 2021).

Jak widzisz, 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 tego związku).

Najogólniej rzecz biorąc, metan wprowadzany do atmosfery w wyniku działalności człowieka może pochodzić (ilustracja 3.2.1.):

- **ze źródeł geologicznych** (gaz ten 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).



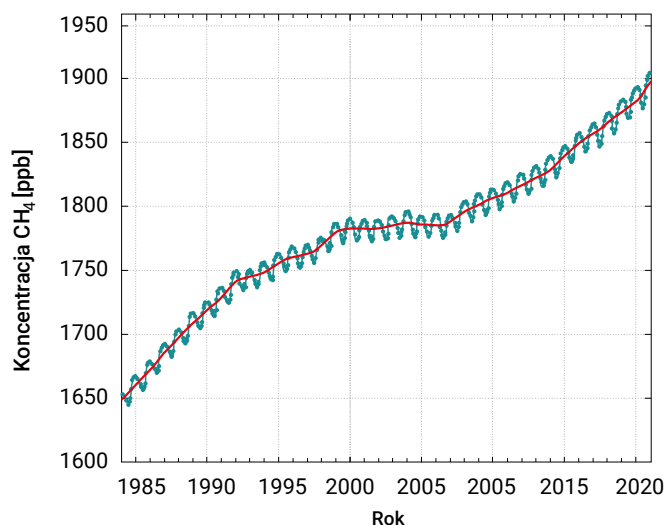
Ilustracja 3.2.1. Globalny bilans emisji i usuwania metanu z atmosfery w latach 2008–2017.

Bilans obliczany jest dwoma metodami: 1) na podstawie pomiarów atmosferycznych, 2) 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.

Ilustracja 3.2.2. 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, 2021.



Jak widać na ilustracji 3.2.2., w latach 90. 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, 2021).

Stężenie metanu podlega sezonowym wahaniom, podobnie jak dwutlenku węgla. W półroczu chłodnym, gdy duża część roślinności obumiera, wzmacnia się intensywność procesów rozkładu, które są naturalnym źródłem emisji metanu.

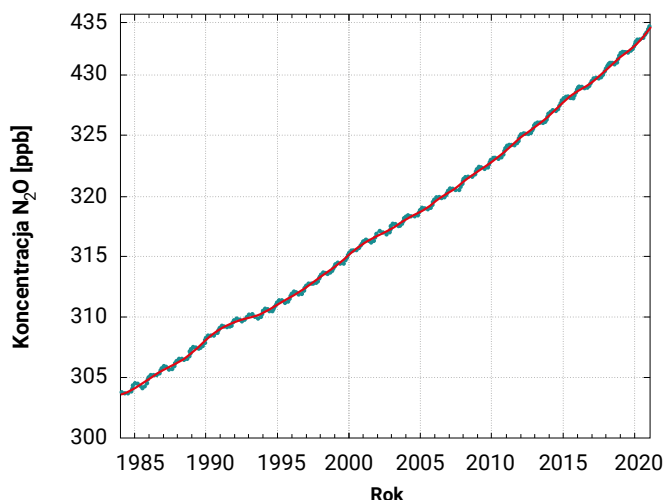
TLENEK AZOTU(I)

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.



Ilustracja 3.2.3. 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, 2021.

W 2020 roku emisja wyniosła średnio $333,2 \pm 0,1$ ppb (ilustracja 3.2.3.), co oznacza wzrost o 23% względem stanu sprzed roku 1750 (World Meteorological Organization, 2021).

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. dezodorantach). Okazało się jednak, że związki te mają bardzo negatywny wpływ na środowisko:

- przyczyniają się do niszczenia warstwy ozonowej występującej w wyższych partiach atmosfery, 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 – uwolnienie nawet niewielkiej ilości takich związków powoduje istotne zaburzenie bilansu energetycznego Ziemi).

CZY WIESZ, ŻE ?

Precyzyjnie mówiąc, *Freon* to zarejestrowana przez producenta (The Chemours Company) nazwa handlowa grupy gazów obejmującej różne chloro- i fluoropochodne węglowodorów.

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),

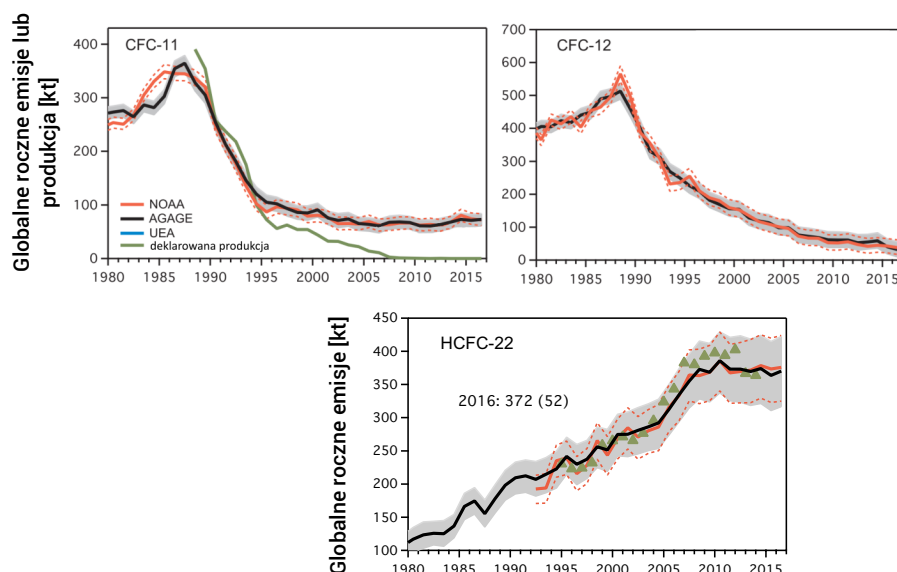
HCFC – hydrochlorofluorocarbons, czyli pochodne węglowodorów, w których tylko niektóre atomy wodoru zamieniono na atomy chloru lub fluoru,

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

Ilustracja 3.2.4. 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.

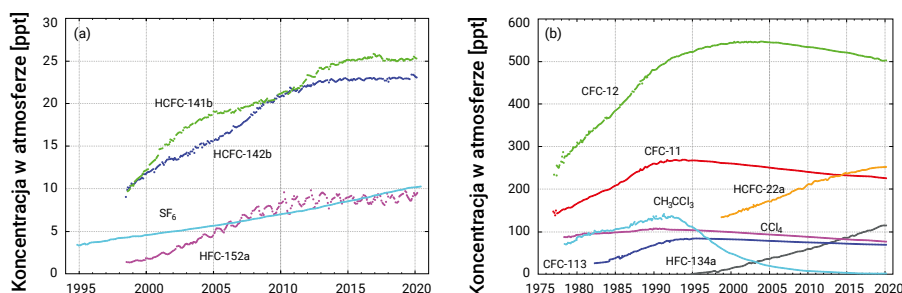
Dlatego na mocy międzynarodowego porozumienia – tzw. Protokołu montrealskiego podpisanego w roku 1987 – freony zostały objęte surową kontrolą i stopniowo wprowadzanym zakazem produkcji. Wycofywane z użycia związki CFC i ich następcy, HCFC, zostały na jakiś czas zastąpione gazami HFC (ilustracja 3.2.4.), 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 pewnym czasie eksploatacji.



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.

Ilustracja 3.2.5. Zmiany koncentracji najważniejszych freonów i heksafluorku siarki (SF_6) w atmosferze (w cząstkach na bilion).

Źródło: World Meteorological Organization, 2019.



W przemyśle, badaniach naukowych czy medycynie stale wykorzystuje się wiele związków chemicznych, z których część jest gazami cieplarnianymi niewystępującymi naturalnie w atmosferze (np. heksafluorek siarki, SF_6 ; ilustracja 3.2.5.). Ich częściowy wykaz znajdziesz na przykład w tabeli 8.A.1. w ósmym rozdziale pierwszej części *Piątego raportu podsumowującego przygotowanego przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmiany Klimatu* (Myhre i in., 2013). Uwolnienie większej ilości tych gazów do atmosfery mogłoby spowodować znaczące zaburzenia w bilansie energetycznym planety. Na szczęście pomiary wskazują, że na razie do tego nie doszło.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Dziura ozonowa
– historia sukcesu**

**Przed czym uchronił nas
Protokół montrealski?**

**Nowy nienowoczesny
gaz cieplarniany**

3.3. Emisje gazów cieplarnianych z różnych sektorów gospodarki

Analizując udział różnych sektorów gospodarki w emisjach gazów cieplarnianych, należy pamiętać o różnicach między poszczególnymi gazami oraz między emisjami bezpośrednimi, pośrednimi i całkowitymi. Największe bezpośrednie emisje gazów cieplarnianych pochodzą obecnie z energetyki.



Unsplash; Wim van Einde

W tym podrozdziale chcielibyśmy wyjaśnić, w jakim stopniu za emisję gazów cieplarnianych odpowiadają poszczególne sektory gospodarki. Jak już wiesz, w wyniku działalności człowieka do atmosfery uwalniane są różne związki – przede wszystkim dwutlenek węgla, ale także metan, tlenek azotu(I) i freony. Aby dokonać zbiorczych porównań między różnymi działami gospodarki, musimy wziąć pod uwagę wszystkie. Jak to zrobić?

Mówiliśmy już o tym, że poszczególne gazy mają różną budowę atomową, a więc i masę cząsteczkową (np. masa atomowa cząsteczki dwutlenku węgla to $44u$, a metanu – $16u$), dlatego w każdym przypadku jednostka masy (np. tona) przekłada się na inną liczbę cząsteczek. Co więcej, każdy związek ma inną zdolność do nasilania efektu cieplarnianego, co zależy między innymi od tego, jakie długości fal pochłania oraz jaka jest jego aktualna koncentracja w atmosferze. Dlatego na potrzeby porównań przeliczamy masę poszczególnych gazów cieplarnianych na **ekwiwalent CO_2** .

EKWIWALENT CO_2 – miara wpływu jednostki masy gazu cieplarnianego innego niż dwutlenek węgla na efekt cieplarniany odpowiadająca masie dwutlenku węgla, która wpłynęłaby w tym samym stopniu na bilans energii Ziemi.

DEFINICJA

Całkowite emisje gazów cieplarnianych związane z działalnością człowieka wyniosły w 2019 roku $58,1 \text{ GtCO}_2\text{e}$ (ekwiwalentu dwutlenku węgla) (United Nations Environment Programme, 2021).

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

DEFINICJA

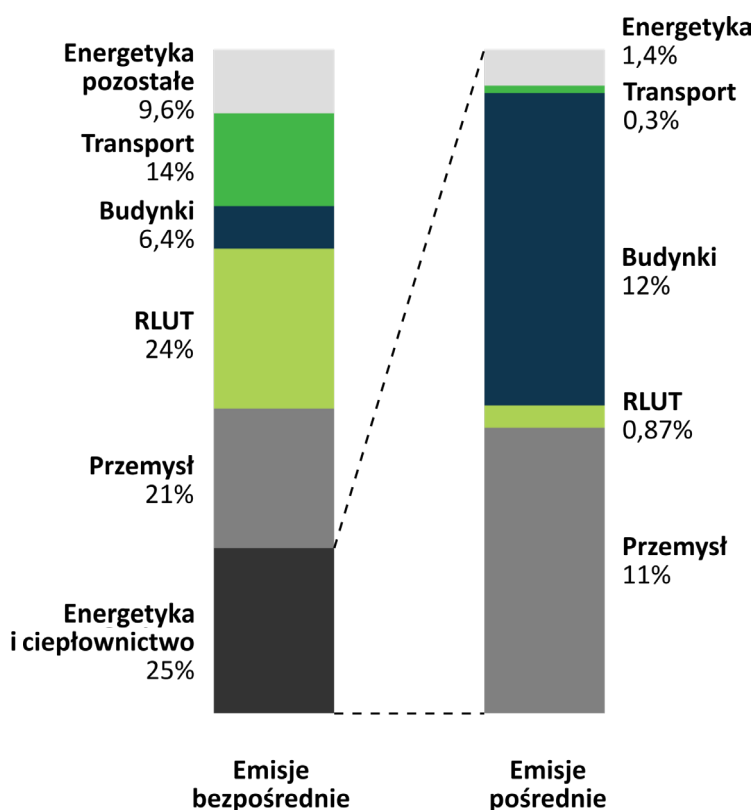
BEZPOŚREDNIE EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH – ilość gazów cieplarnianych emitowanych do atmosfery w danym sektorze czy przy określonej działalności, na przykład: emisje ze spalania drewna w kominkach wchodzą w skład bezpośrednich emisji z budynków, a emisje metanu z ryżowisk to element bezpośrednich emisji z rolnictwa.

DEFINICJA

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

Emisje bezpośrednie i pośrednie przedstawiono na ilustracji 3.3.1. Zwróć uwagę, że całkowite emisje (suma emisji 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 wnętrza itd. Podział odpowiedzialności za emisje gazów cieplarnianych może zależeć od przyjętej konwencji. Korzystając z różnych źródeł danych o emisjach, należy zwrócić uwagę, czy i jakie emisje pośrednie uwzględniono w opracowaniach.

Ilustracja 3.3.1. Całkowite emisje gazów cieplarnianych (w przeliczeniu na ekwiwalent dwutlenku węgla) poszczególnych sektorów gospodarki według danych z roku 2010, z wyróżnieniem emisji bezpośrednich i pośrednich (dane za IPCC, 2014). Skrót RLUT oznacza 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. Ciepło wydzielane podczas ich spalania 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 około 85% produkcji energii pierwotnej.

Energetyka jest źródłem większości emisji dwutlenku węgla związanych z działalnością człowieka, ale także znacznej części (30–35%) emisji metanu (jak pamiętasz z poprzedniego podrozdziału, 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 przyczynia się do ok. 30% antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych. W około 1/3 jest to efekt wykorzystania energii elektrycznej do napędzania wszelkiego rodzaju maszyn, jednak 2/3 to bezpośredni efekt procesów technologicznych, takich jak:

- **produkcja cementu** (aktualnie odpowiada za ok. 4% całkowitej antropogenicznej emisji CO₂) (Friedlingstein i in., 2022);
- **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 dotyczących emisji gazów cieplarnianych 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 tymi samymi procesami fizycznymi i biologicznymi prowadzącymi do emisji gazów cieplarnianych. Ponadto zmiany użytkowania terenu prowadzone są często na potrzeby rolnictwa lub leśnictwa albo polegają na zmianie kategorii terenu, na przykład z leśnej na rolniczą lub na odwrót. Rozdzielenie skutków poszczególnych przedsięwzięć pomiędzy odrębne sektory mogłoby 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 wynikających z wykorzystania energii elektrycznej czy paliw napędzających maszyny. W większości chodzi o emisje związane ze zmianami użytkowania terenu (aktualnie ok. 11% antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych), (United Nations Environment Programme, 2021), 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 na biurku – na każdym z tych etapów jakaś część energii pierwotnej jest tracona.



HODOWLA ZWIERZĄT

Szczególnie obciążającym dla klimatu działem rolnictwa jest hodowla zwierząt, która odpowiada za około 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, intensywna uprawa roślin z użyciem dużej ilości nawozów sztucznych, przetwarzanie i transport paszy, produkcja i transport nawozów itd. – ok. 45% emisji z hodowli;
- **metan powstający w przewodach pokarmowych 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).

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl
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 (w ok. 2/3) są one związane ze zużyciem energii elektrycznej (do oświetlenia, ogrzewania, klimatyzacji, zasilania urządzeń gospodarstwa domowego i sprzętów elektronicznych) lub ciepłej (centralne ogrzewanie). Mniej więcej 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% 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).

Jak widzisz, emisje związane z lotnictwem to zaledwie ok. 11% emisji gazów cieplarnianych związanych z transportem. Dlaczego 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 w przeliczeniu na jedną osobę. Dlatego 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 również:
 - › parę wodną, której w wyższych partiach atmosfery jest na ogół 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 tych gazów 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 można też zaliczyć do emisji pośrednich z tej branży, podobnie jak te związane ze zużyciem energii elektrycznej.

3.4. Emisje gazów cieplarnianych a klimat

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

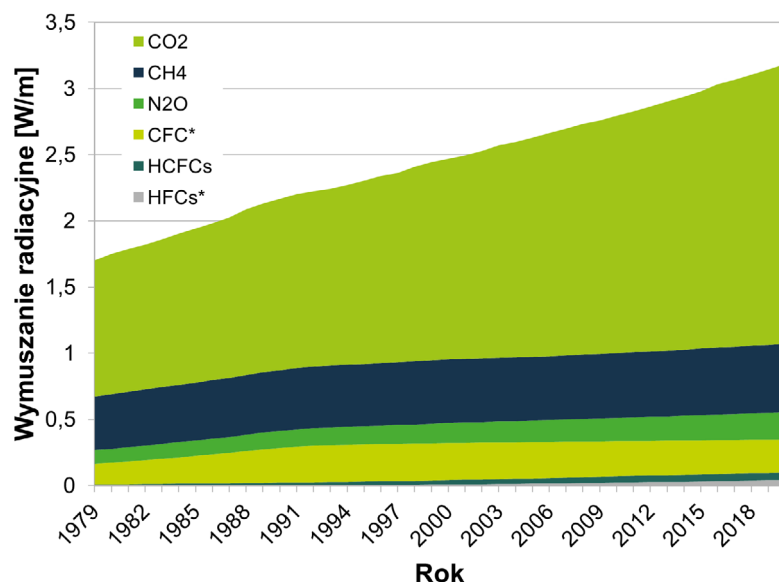


Unsplash; Nik Shuliahin

Jak już wyjaśnialiśmy w tym rozdziale, działalność człowieka powoduje emisje różnych gazów cieplarnianych – zarówno takich, które już występowały w atmosferze (CO_2 , CH_4 , N_2O), jak i zupełnie nowych (freony i inne gazy przemysłowe). Na ilustracji 3.4.1 pokazano, w jakim stopniu poszczególne gazy odpowiadają za obserwowany w ostatnich dekadach wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi, nazywany też globalnym ociepleniem. Na skali pionowej oznaczono **wymuszenie radiacyjne** – wielkość określającą, jak występowanie konkretnego czynnika wpłynęło na ilość energii wydostającej się z atmosfery (w jednostce czasu, z jednostki powierzchni). Jest to bardzo dobra miara – jak pamiętasz z podrozdziałów 1.1. i 1.2. o efekcie cieplarnianym i o bilansie energetycznym, wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje zatrzymywanie większej ilości energii w ziemskim systemie klimatycznym (a więc ograniczenie jej ucieczki w kosmos).

DEFINICJA

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



Ilustracja 3.4.1. 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 (jakie to ma znaczenie, przypomnisz sobie, zaglądając do rozdziału 1.).

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

Jak możesz zauważyć, największy wkład we wzrost średniej temperatury ma zwiększenie się koncentracji dwutlenku węgla – jest go najwięcej i jego emisje są najpowszechniejsze. Drugie miejsce zajmuje metan, a trzecie tlenek azotu(I). Niepomijalny jest też wkład freonów i innych 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 do jej średniej temperatury. Nawet jeśli para wodna trafia do atmosfery w wyniku działań człowieka (np. wydostając się z chłodni kominowych albo silników napędzanych wodorem), efekt jest niwelowany przez naturalne zjawiska: osłabienie parowania z powierzchni Ziemi oraz nasilenie skraplania pary w atmosferze. Trwałe podniesienie koncentracji pary wodnej w powietrzu może nastąpić jedynie w wyniku wzrostu średniej temperatury planety. Para wodna jest elementem silnego dodatniego sprzężenia dla zaburzeń klimatu, ale nie ich wymuszenia.

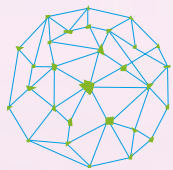


Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Para wodna – klimatyczny „dopalacz”



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH



KLIMATYCZNE
ABC

TOMASZ ŻYLICZ

ORCID 0000-0003-2134-8498, Uniwersytet Warszawski

JAN WITAJEWSKI-BALTVILKS

ORCID 0000-0002-2944-0064, Uniwersytet Warszawski

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

4. Dlaczego emisje gazów cieplarnianych wciąż rosną?

Powstrzymanie zmiany klimatu to dzisiaj niewątpliwie jedno z największych wyzwań stojących przed ludzkością. Ponieważ wiemy już, że przyczyniają się do niej gazy cieplarniane, intuicja podpowiada nam, że aby ten problem rozwiązać, należy zmniejszyć ich emisję. Eksperci z różnych dziedzin wskazują wiele sposobów jej ograniczenia: obniżenie emisyjności energetyki, zmniejszenie konsumpcji, zwiększenie wydajności energetycznej, rozwój niskoemisyjnego transportu, regulacje prawne i inne.

Analizując skutki rozwiązań mających na celu ograniczenie zmiany klimatu, należy pamiętać o tym, że modyfikacja jednego obszaru organizacji społecznej wpływa na wiele aspektów życia zarówno wymiarze państwowym, jak i globalnym. Na przykład ograniczenie korzystania z samochodów z silnikami spalinowymi w krajach rozwiniętych gospodarczo zmniejsza lokalny poziom emisji, jednocześnie zwiększa jednak eksport używanych samochodów do krajów, w których nie ma takich ograniczeń – w ten sposób emisje generowane przez samochody są częściowo przenoszone w inne miejsca planety.

Aby ocenić całkowity wpływ działań mających na celu powstrzymanie katastrofy klimatycznej, należy analizować je w sposób kompleksowy, uwzględniając zależności między poszczególnymi sektorami gospodarki, międzynarodowe powiązania handlowe i koszty rozwiązań alternatywnych wobec stosowanych obecnie.

W tym rozdziale przedstawimy dwa szczególnie ważne aspekty, które należy wziąć pod uwagę przy dokonywaniu tego rodzaju analizy. Klimat planety jest dobrem wspólnym, dlatego oceniając efekty działań proklimatycznych, należy uwzględniać sektorowe i międzynarodowe powiązania gospodarcze. Należy również obiektywnie porównywać wpływ różnych czynników na poziom emisji gazów cieplarnianych. Pomocne w takiej analizie może być proste równanie matematyczne, nazywane **tożsamością Kaya**.

4.1. Klimat jako dobro publiczne

Klimat jest dobrem publicznym – wszyscy z niego korzystamy i wszyscy na niego oddziałujemy. Dlatego skuteczne dbanie o klimat wymaga wspólnego, skoordynowanego działania i unikania tzw. jazdy na gapę.

Podjęcie działań w skali światowej jest dużym wyzwaniem, ale wiemy, jak można by je wprowadzać.

CO JEST DOBREM PUBLICZNYM?

W ekonomii przymiotnik **publiczny** ma ściśle określone znaczenie.

Dobro publiczne określają dwie zasady:

- **niewykluczalności**
 - i **niekonkurencyjności**.
- Pierwsza głosi, że jeśli tylko dobro zostało dostarczone, to nie można nikogo wykluczyć z grona korzystających.
- Druga zaś stwierdza, że wykorzystanie dobra przez jednego użytkownika nie przeszkadza, by mógł z niego równocześnie korzystać ktoś inny.



Pexels: Kenneth Carpina

Klimat jest szczególnym dobrem publicznym, ponieważ nie ulega wątpliwości, że w jego przypadku spełnione są obie te zasady.

Nikogo nie da się wykluczyć z grona osób objętych skutkami zmian klimatycznych – konsekwencje dotyczą wszystkich. Innymi słowy, z ochrony klimatu mogą korzystać wszyscy, niezależnie od tego, czy mieli w tym jakikolwiek udział. Zarazem psucie klimatu szkodzi wszystkim, także tym, którzy nie są za to odpowiedzialni.



O dobrach publicznych można przeczytać w każdym podręczniku mikroekonomii – na przykład: Varian, H. (2019). *Mikroekonomia. Kurs średni – ujęcie nowoczesne*. Warszawa: PWN.



O ochronie klimatu z perspektywy ekonomicznej możesz przeczytać w popularnonaukowych felietonach prof. Tomasza Żylicza publikowanych w miesięczniku *Aura*.

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



Klasyczną pozycją zawierającą analizę ekonomicznych metod ochrony klimatu jest: Tol, R.S.J. (2014 i późn. wyd.). *Climate Economics. Economic Analysis of Climate Change and Climate Policy*. Amsterdam: Edward Elgar Publishing.



JAZDA NA GAPE

Od wielu pokoleń ekonomiści analizują mechanizmy dostarczania dóbr publicznych. Charakterystyczna dla tego procesu jest pewnego rodzaju odpowiedzialność zbiorowa wywołująca zjawisko znane jako **jazda na gapę** (*free riding*). Skutek tego zjawiska określa się w żargonie ekonomicznym jako niedostateczną podaż dóbr publicznych, co w przypadku zmiany klimatycznej oznacza po prostu podejmowanie działań na rzecz ochrony klimatu w niedostatecznej skali.

Z powodu powszechnie występującej „jazdy na gapę”, niewielu ludzi kwapi się, żeby chronić klimat. **Niektórzy mogą nie życzyć sobie, żeby z owoców ich wysiłku korzystali także ci, którzy nie zrobili nic.** Bardziej typowym motywem uchylania się od wysiłku potrzebnego naszej planecie jest jednak **oczekiwanie, że zostanie on podjęty przez kogoś innego**, a wtedy – na podstawie zasady niewykluczalności – tak czy inaczej będzie można z niego korzystać.

ZARZĄDZANIE DOBRAMI PUBLICZNYMI

Podaż dóbr publicznych – których przykładami są ład przestrzenny, obrona przeciwlotnicza czy jakość powietrza – może być dostateczna, jeśli jest za nie odpowiedzialny pojedynczy podmiot. Rząd mógłby na przykład postanowić o stworzeniu obrony przeciwlotniczej, która służyłaby całemu krajowi, niezależnie od tego, czy wszyscy potencjalni beneficjenci byłiby gotowi solidarnie podjąć taką decyzję (z pewnością znalazłaby się grupa osób, która chętnie by się do tego nie włączyła, korzystając z możliwości „jazdy na gapę”). Podobnie samorząd terytorialny może wprowadzić ład w zagospodarowaniu przestrzennym, który przypuszczalnie nie mógłby powstać, gdyby decyzje lokalizacyjne miały być podejmowane spontanicznie.

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

Nie ma jednak rządu globalnego i nie wygląda na to, aby taki organ powstał w najbliższej przyszłości. 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, której przewodniczy Sekretarz Generalny. Kompetencje ONZ są jednak bardzo ograniczone, a w sprawach klimatu sprowadzają się do przygotowywania porozumień międzynarodowych.

TRAGEDIA WSPÓLNEGO PASTWISKA

Problem skutecznego zarządzania środowiskowymi dobrami publicznymi opisywany jest w literaturze jako **tragedia wspólnego pastwiska** (*Tragedy of the Commons*). Warunkiem pomyślnego rozwiązania tego problemu jest takie wykorzystanie zasobu naturalnego, aby nie przekroczyło ono jego zdolności do samodzielnego odnawiania się (wszak ryby się mnożą, trawa na pastwisku rośnie, a naturalne procesy w pewnym stopniu stabilizują klimat – jeżeli tylko da im się na to szansę).

W przypadku klimatu decyzje, które mogą podjąć poszczególne kraje, można zilustrować następująco: przedstawione na rysunku korzyści lub straty symbolizują niebieskie (○) lub czerwone (○) kółka.

PAŃSTWO 1

	DECYZJA	ograniczać emisje	nie ograniczać emisji
ograniczać emisje		11	-23
nie ograniczać emisji		3-2	-1-1

PAŃSTWO 2

Ilustracja 4.1.1. Diagram ilustrujący trudność negocjowania racjonalnych decyzji w sytuacji braku współpracy i wzajemnego zaufania.

Dlaczego – jak wynika z tego diagramu – racjonalnie zachowujące się państwo nie zdecyduje się na ograniczanie emisji? Odpowiedź można wywnioskować z tego samego diagramu: żaden z krajów, jeśli zachowuje się racjonalnie i podejmuje decyzję wyłącznie z własnej perspektywy, nie ma motywacji do ograniczenia własnych emisji.

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). Ponieważ ludzie w obu krajach rozumują podobnie, efektem ich wspólnych decyzji jest wybór najgorszego rozwiązania, w którym oba kraje tracą: -1 -1.

Ten prosty schemat wyjaśnia, dlaczego podjęcie wspólnej decyzji o przystąpieniu do działań ograniczających emisję gazów cieplarnianych jest takie trudne. Na szczęście porozumienie jest możliwe, wymaga jednak chęci współpracy oraz zaufania wobec drugiej strony. Decyzja o skoordynowanym, wspólnym działaniu jest tym trudniejsza, im więcej stron ma się na nie zgodzić. Skuteczne ograniczanie zmiany klimatu jest skomplikowanym przedsięwzięciem, wymaga bowiem uczciwego i szczerego zaangażowania ze strony wszystkich krajów świata.



Więcej o tym, jak dochodzi do wyczerpywania zasobów na stronie www.stuartmcmillen.com/pl w komiksach:

Wyspa Świętego Mateusza
Peak Oil, czyli szczyt wydobywania ropy naftowej



Warto zająć do artykułu, który spopularyzował pojęcie tragedii wspólnego pastwiska: Hardin, G. (1968). The tragedy of the Commons. *Science*, 162(3859), 1243–1248

oraz do analizy czynników decydujących o budowaniu międzynarodowych porozumień dotyczących zmiany klimatu: Ansari, 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.



Warto zajrzeć do deklaracji z Konferencji w Rio de Janeiro z 1992 roku dostępnej na stronie UN.org



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 rozpoczęły wycofywanie się z porozumienia. Proces ten został jednak zatrzymany w 2021 roku przez nowego prezydenta USA Joe Bidena.



Szczegółowe informacje o porozumieniach klimatycznych można znaleźć na stronie UNFCCC – The United Nations Framework Convention on Climate Change: <https://unfccc.int>



KONWENCJA KLIMATYCZNA

W 1992 roku, w Rio de Janeiro w Brazylii, podpisano obowiązującą do dziś Ramową Konwencję do spraw Zmiany 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 wszyscy członkowie ONZ. Ową powszechność osiągnięto jednak za cenę braku zobowiązań dla przytłaczającej większości sygnatariuszy.** Jest to efekt najbardziej znanego uzupełnienia konwencji – Protokołu z Kioto przyjętego w 1997 roku. Przewidziane w nim zobowiązania dotyczą jedynie kilkudziesięciu krajów uznanych w latach 70. XX wieku 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 krajów uwalniających duże ilości dwutlenku węgla, a więc stało się pierwszym krokiem mającym na celu wyeliminowanie zjawiska jazdy na gapę. Był to jednak nieznaczny krok, ponieważ deklaracje są dobrowolne i obejmują zobowiązanie do ograniczenia emisji w stopniu, który nie pozwala na skuteczną ochronę klimatu. Zrealizowanie zadeklarowanych w Porozumieniu paryskim działań ograniczających emisję pozwoli na spowolnienie tempa wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi, dzięki czemu w 2100 roku wyniesie ona około 3,5°C więcej niż w okresie przedprzemysłowym – bez podjęcia takich działań poziom ten wzrośnie o około 5°C. Dlatego ważne jest, aby kraje stopniowo zwiększały wstępne deklaracje ograniczenia emisji do poziomu pozwalającego na zatrzymanie wzrostu temperatury na poziomie 2°C.

SKUTECZNA OCHRONA KLIMATU

Zmagania towarzyszące konwencji klimatycznej ilustrują typowy problem gospodarowania dobrem publicznym. Jego podaż jest niedostateczna, jeśli nie ma podmiotu sprawującego władzę nad obszarem, którego dotyczy zasada niewykluczalności. Warto zwrócić uwagę na fakt, że przewaga korzyści wynikających z ochrony klimatu nad kosztami nie jest w stanie zlikwidować jazdy na gapę. Podobnie przewaga strat spowodowanych niepodjęciem tej ochrony nad uzyskanymi w ten sposób oszczędnościami nie sprawi, że zjawisko jazdy na gapę zniknie. Nie istnieje bowiem podmiot decyzyjny (rząd światowy), który mógłby podjąć decyzje prowadzące do osiągnięcia globalnych korzyści i zapewnić ewentualną rekompensatę tym, którzy mają nieproporcjonalnie mały udział w korzyściach.

Aby przezwyciężyć 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 uniemożliwiających jazdę na gapę.

Niemówność podjęcia skutecznych działań na rzecz ochrony klimatu wobec braku rządu światowego czy podpisania odpowiedniego porozumienia międzynarodowego nie oznacza, że jesteśmy całkiem bezradni. Potrzebne jest popularyzowanie wiedzy na ten temat, aby zyskać większe poparcie dla ochrony klimatu, także wśród społeczeństw mniej zamożnych. Politycy wszystkich państw powinni wiedzieć, że społeczeństwa oczekują od nich działań i że potrzebne jest realizowanie międzynarodowych porozumień skutecznie ograniczających emisję gazów cieplarnianych.

ADAPTACJA DO ZMIANY KLIMATU

Adaptacja do zmiany klimatu nie ma globalnego charakteru tak jak jego ochrona. Może być podejmowana na szczeblu znacznie niższym, na przykład przez lokalne rządy. Polega ona bowiem na działaniach, które mogą być skuteczne niezależnie od tego, co robią inni. Sadzenie drzew dających ludziom schronienie przed falami upałów jest możliwe na szczeblu lokalnym. Podobnie samorządy mogą podejmować działania zmierzające do poprawy retencji wody itd.

Należy jednak podkreślić, że chociaż adaptacja do zmiany klimatu jest konieczna, nie może zastępować starań o ochronę klimatu. Drastyczna zmiana klimatu, która wystąpi, jeśli nie zostaną podjęte działania skutecznie ograniczające emisję gazów cieplarnianych, znacznie przekroczy możliwości adaptacji.



4.2. Tożsamość Kaya – źródła wzrostu emisji

Tożsamość Kaya to równanie przedstawiające wpływ, jaki na emisje CO₂ mają czynniki takie jak: wielkość populacji, zamożność społeczeństwa, efektywność energetyczna państwa oraz emisyjność energetyki. Teraz przyjrzymy się bliżej tym zależnościom i zobaczymy, czego – dzięki analizie równania – możemy dowiedzieć się o przyczynach wzrostu emisji dwutlenku węgla. Ta część podręcznika powstała na podstawie rozdziału 5. raportu IPCC 5th Assessment Report, Working Group 3.

W poprzednich podrozdziałach przedstawiliśmy problem 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, w którym tłumaczy się go za pomocą trzech rodzajów analiz: dzieląc wzrost na regiony geograficzne, na sektory oraz na czynniki socjoekonomiczne.

Zrozumienie przyczyn zwiększenia emisji gazów cieplarnianych, a w szczególności jej przyspieszenia na początku XXI wieku, pozwoli nam odpowiedzieć na ważne pytania:

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

Jedno matematyczne równanie pozwala nam w uporządkowany 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, opracowane przez japońskiego ekonomistę Yoichi Kaya, jest nazwane **tożsamością Kaya**. Nie opiera się ono na żadnych założeniach, to znaczy, że jest prawdziwe w każdych warunkach i w każdym czasie (aby to dostrzec, wystarczy skrócić liczniki i mianowniki po jego prawej stronie).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu) – jest to międzyrządowe ciało naukowe i doradcze utworzone w 1988 roku. Celem IPCC jest dostarczenie obiektywnej, naukowej informacji na temat zmiany klimatu.

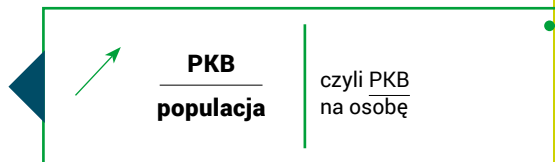
Głównymi dokumentami publikowanymi przez IPCC są raporty na temat zmiany klimatu, jej konsekwencji, możliwości adaptacji oraz ograniczenia ocieplenia. IPCC nie prowadzi pomiarów, obserwacji ani innego rodzaju badań. Swoje opracowania opiera na artykułach opublikowanych wcześniej przez naukowców z całego świata.

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

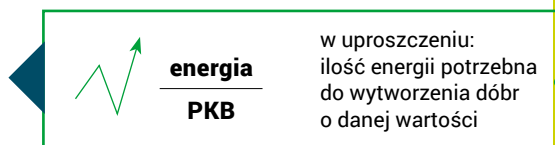
- wzrostu demograficznego,



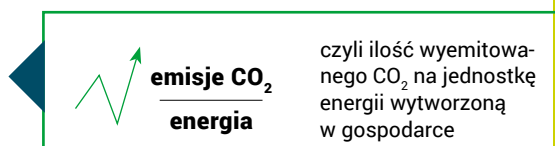
- wzrostu zamożności społeczeństw,



- zmiany energochłonności gospodarki,



- zmiany uzależnienia wytwarzania energii od paliw kopalnych, czyli ropy, gazu i węgla.



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

Przyglądając się tożsamości Kaya, możemy sformułować kilka ciekawych wniosków. Po pierwsze, samo ograniczenie konsumpcji ($\frac{\text{PKB}}{\text{populacja}}$) nie pozwala zredukować emisji dwutlenku węgla do zera. Po drugie, jest możliwe rozdzielenie (tzw. *decoupling*) wzrostu jego 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 lat 90., któremu towarzyszył spadek emisji CO₂. Po trzecie, jeśli zaawansowane zmiany sposobów produkcji w gospodarce okażą się niemożliwe, niezbędne będzie ograniczenie konsumpcji lub zmniejszenie tempa wzrostu populacji.

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 wiele czynników (wykształcenie, regulacja, kapitał społeczny i technologia), jednak jej wzrost w długim okresie zależy przede wszystkim od tempa postępu technologicznego.

Zmiany czynników trzeciego i czwartego, czyli energochłonności gospodarki i sposobu wytwarzania energii, są zdeterminowane głównie przez tempo oraz kierunek zmian technologicznych. Skonstruowanie 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 wieku spopularyzował pozyskiwanie energii z paliw kopalnych

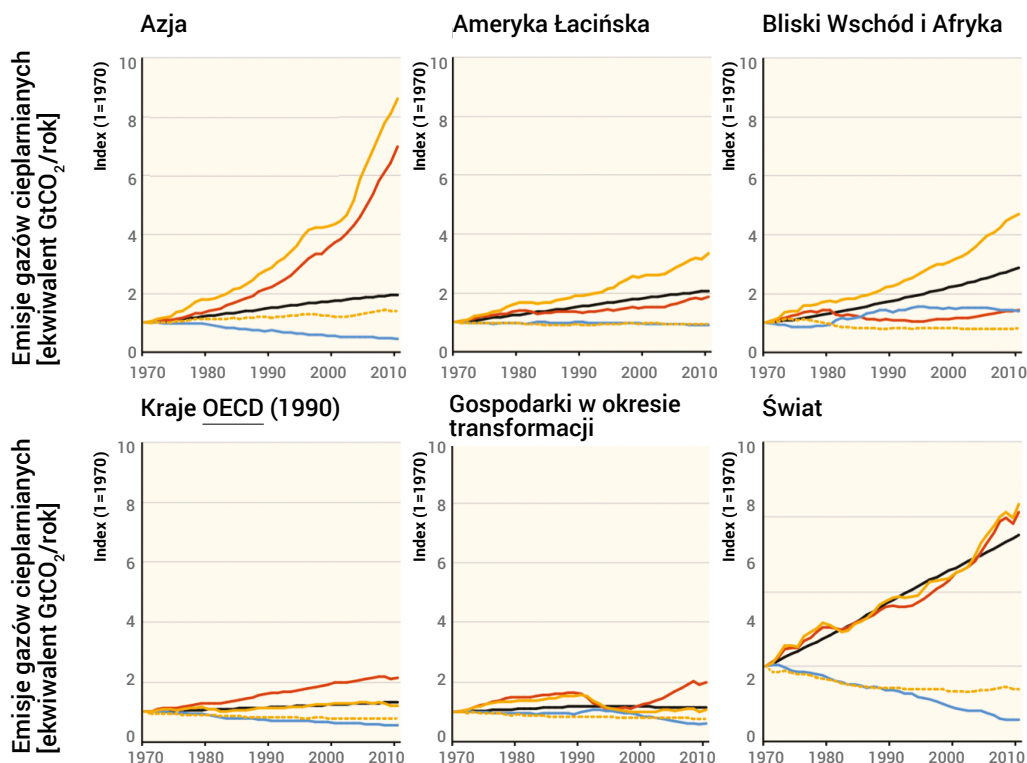
(kosztem odejścia np. od młynów wodnych). Natomiast rozwój turbin wiatrowych na początku XXI wieku pozwala na odchodzenie od wytwarzania energii pochodzącej ze spalania węgla.

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

Raport IPCC zwraca uwagę, że w ostatnich dziesięcioleciach podstawową przyczyną zwiększenia emisji był wzrost konsumpcji (wykres w prawym dolnym rogu ilustracji 4.2.1.). Tempo zmniejszenia energochłonności globalnej gospodarki, które nastąpiło w tym czasie, było niewystarczające, aby przezwyciężyć wzrost konsumpcji. Oznacza to, że globalne zużycie energii wzrosło. Tożsamość Kaya wskazuje, że teoretycznie ten wzrost mógłby zostać skompensowany zmniejszeniem ilości emisji na jednostkę energii. Taka zmiana rzeczywiście się dokonała, ale jej tempo było niewystarczające. Dlatego całkowite emisje na świecie rosły.

Ilustracja 4.2.1.
Dekompozycja emisji CO_2 w regionach świata.
Źródło: IPCC AR5 WG3.

— ludność
— PKB per capita
— energia/PKB
— energia z paliw kopalnych/energia
— energia z paliw kopalnych



Organisation for Economic Cooperation 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.

Warto jednak zauważyć, że przyczyny wzrostu emisji znacząco różnią się między poszczególnymi regionami. **W Azji wzrost ten wynikał z bardzo szybkiego wzrostu zamożności konsumentów.** Zwiększenie emisji CO_2 byłoby tam jeszcze wyższe, gdyby nie bardzo szybkie zmniejszenie energochłonności gospodarki. Wzrost populacji w tamtym regionie odgrywał relatywnie mniejszą rolę. **Niemal odwrotne zjawisko można zauważyć w Afryce i na Bliskim Wschodzie (region MEA).** W tym regionie to wzrost populacji był główną przyczyną wzrostu emisji. Zaobserwowano tu również zwiększenie energochłonności gospodarki. Gdyby zamożność (czyli produkcja na osobę) w regionie MEA rosła tak szybko jak w Azji, wzrost emisji w MEA byłby bardzo duży. Wzrost zamożności był tu jednak bardzo skromny.

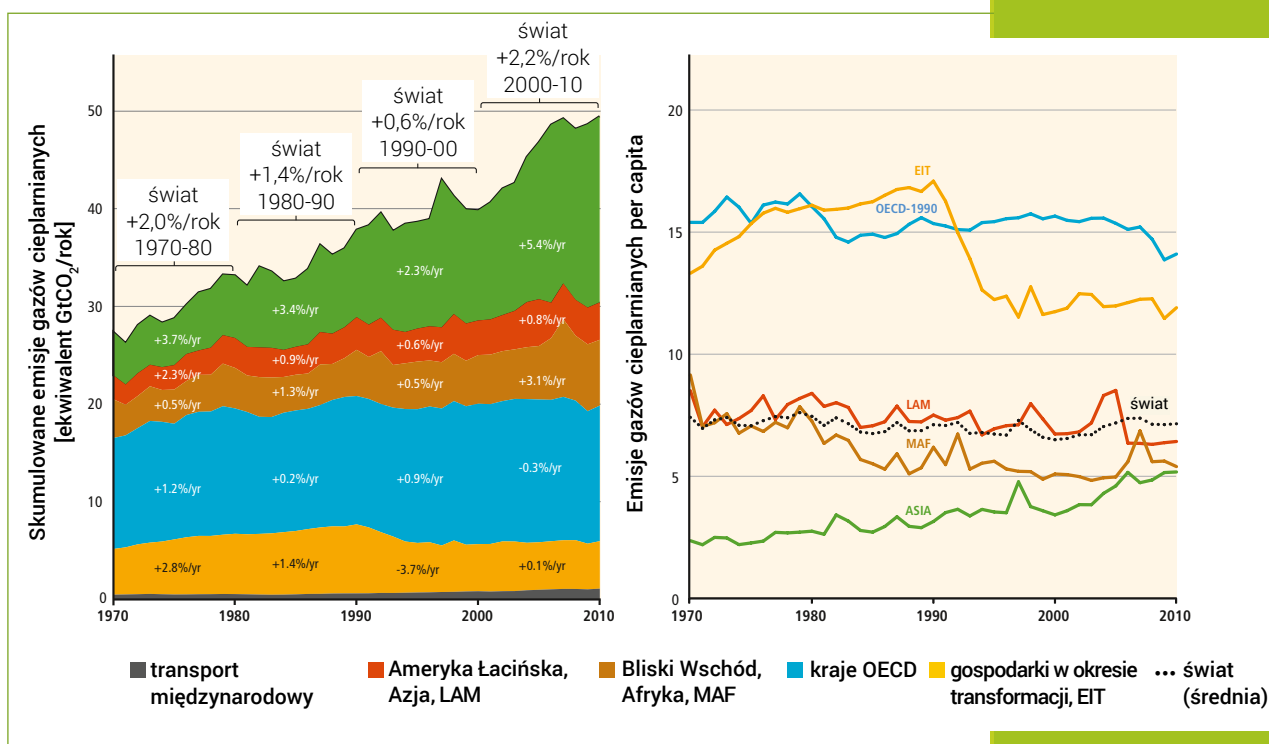
W krajach rozwiniętych (region OECD) wzrost zamożności był niemal zrównoważony przez spadek energochłonności. Emisje w tym regionie wzrosły nieznacznie. Ciekawy obraz rysuje się dla regionu gospodarek przechodzących transformację (do których w raporcie IPCC zaliczała się Polska) w okresie 1990–2010. W tym czasie wystąpił w nich jednocześnie bardzo gwałtowny wzrost zamożności i spadek energochłonności. Spadek ten nie wystąpił w regionie Ameryki Łacińskiej. W tym regionie wzrost produkcji i wzrost populacji przełożył się na znaczny wzrost emisji dwutlenku węgla.

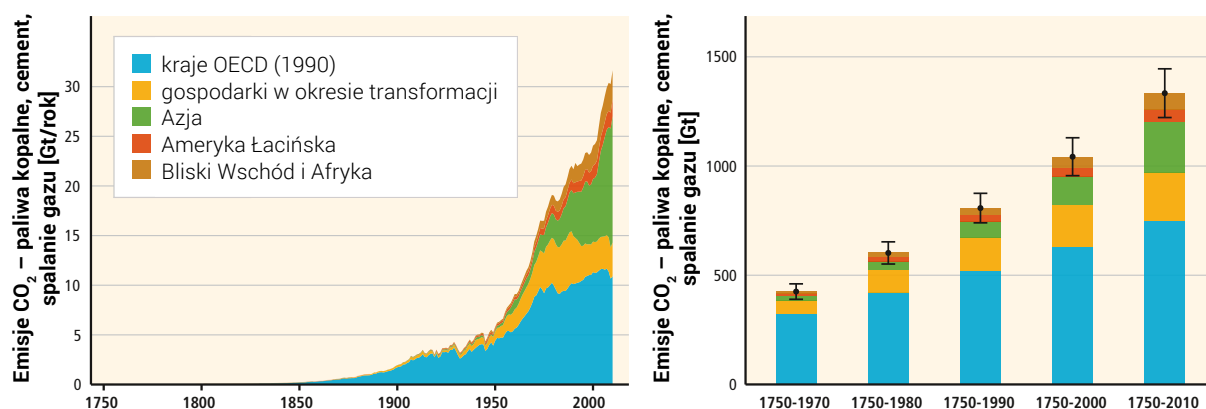
Porównanie wzrostu emisji w różnych regionach wskazuje potencjalne problemy z redukcją globalnych emisji w przyszłości. Największym problemem wydaje się być Afryka. Realizacja Celów Zrównoważonego Rozwoju (*Sustainable Development Goals*) wyznaczonych przez ONZ wymagałaby znacznego wzrostu konsumpcji w tym regionie. Jeżeli ten wzrost nałoży się na dalsze zwiększenie populacji i energochłonności tamtejszych gospodarek, doprowadzi to do niespotykanego wcześniej wzrostu emisji. Z historycznych trendów wynika, że trudno oczekiwać zatrzymania tego procesu w innych regionach rozwijających się. Nie udało się także ograniczyć emisji w krajach rozwiniętych. **Zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych 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 obecnej emisji w poszczególnych regionach i historyczną odpowiedzialność za koncentrację gazów cieplarnianych w atmosferze. Chociaż najszybszy wzrost odnotowano w Azji, to nawet dzisiaj emisje na osobę w tym regionie są kilkakrotnie niższe niż emisje na osobę w krajach rozwiniętych (OECD) (prawy wykres na ilustracji 4.2.2.). 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 wykres na ilustracji 4.2.3.).

Ilustracja 4.2.2. Trendy całkowitej emisji (lewy wykres) i emisji na osobę (prawy wykres) gazów cieplarnianych w różnych regionach świata.

Źródło: IPCC AR5 WG3.

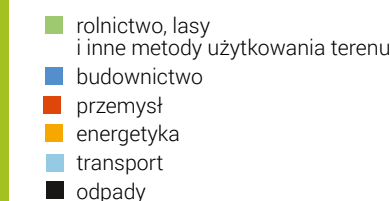




Ilustracja 4.2.3. Emisje (lewy wykres) i skumulowane emisje (prawy wykres) w różnych regionach świata.

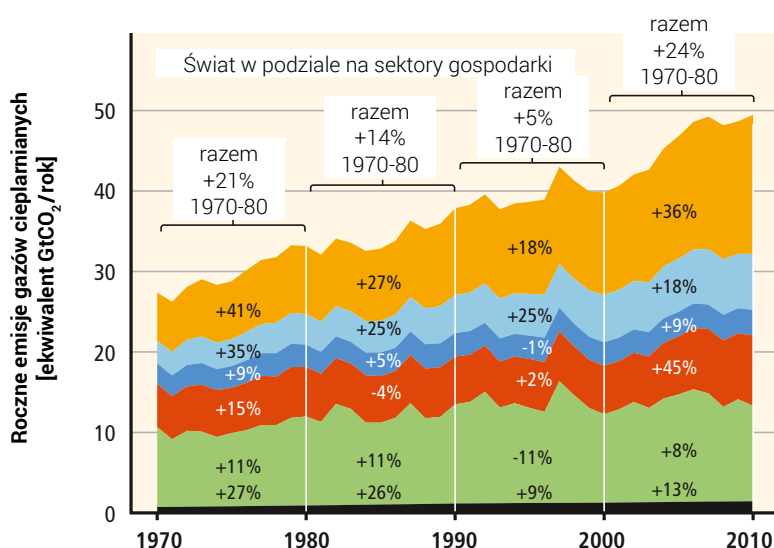
Źródło: IPCC AR5 WG3.

Trzecim sposobem na zrozumienie źródeł wzrostu globalnych emisji jest dekompozycja sektorowa. Ilustracja 4.2.4. 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 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.



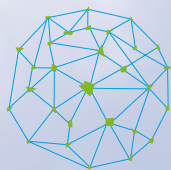
Ilustracja 4.2.4. Źródła emisji gazów cieplarnianych w globalnej gospodarce w podziale na sektory.

Źródło: IPCC AR5 WG3.



Dane do tożsamości Kaya dla poszczególnych krajów:

<https://ourworldindata.org/emissions-drivers>



KLIMATYCZNE ABC

MAGDALENA BUDZISZEWSKA

ORCID 0000-0002-1837-2086, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

ORCID 0000-0001-7252-4581, Uniwersytet Warszawski

5. Fakty i mity o zmianie klimatu

Z poprzednich rozdziałów już wiesz, w jaki sposób działalność człowieka doprowadziła do globalnej zmiany klimatu – wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi. Jest to skutek emisji gazów cieplarnianych (przede wszystkim dwutlenku węgla pochodzącego ze spalania paliw kopalnych), których obecność w atmosferze naruszyła bilans energetyczny naszej planety. Takich skutków rozwoju przemysłu spodziewano się już w XIX wieku (więcej na temat historii badań klimatu na stronie www.naukaoklimacie.pl). To, że nastąpiły, potwierdza, że trafnie rozumiemy i opisujemy funkcjonowanie systemu klimatycznego naszej planety.

W pierwszych dwóch częściach tego rozdziału przeczytasz o dowodach na antropogeniczne (spowodowane działalnością człowieka) pochodzenie współczesnej zmiany klimatu. Przyjęte obecnie wyjaśnienie zasad funkcjonowania systemu klimatycznego Ziemi jest dobrze zweryfikowaną teorią naukową.

TEORIA NAUKOWA – zestaw twierdzeń 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 słuszność została wielokrotnie przetestowana i potwierdzona.

DEFINICJA

Jak każda teoria, również ta podlega weryfikacji. Naukowcy stale starają się ją udoskonalać i znaleźć w niej luki. Całkowite obalenie jej podstawowych elementów (np. 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, ponieważ 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 na podstawie nieistniejących praw. Mimo to wciąż stosunkowo często można spotkać twierdzenia, które miałyby teorię opisującą działanie klimatu obalić. Zwykle są one przykładem rozmaitych błędów logicznych lub manipulacji. Jak je rozpoznawać i rozbrajać, dowiesz się z drugiej części tego rozdziału.

5.1. 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.

Więcej o tym, jak rodzi się konsensus oparty na wiedzy – na przykład na temat zmiany klimatu – na stronie www.naukaoklimacie.pl

Zrozumieć kontrowersje wokół zmiany klimatu

część 1: Konsensus naukowy



Ziemi system klimatyczny jest stale badany za pomocą najrozmaitszych metod przez naukowców różnych dziedzin – fizyki, meteorologii, oceanologii, geologii, glaciologii czy biologii. Ich urządzenia pomiarowe znajdują się na powierzchni Ziemi, pływają w oceanach, są unoszone w powietrzu przez samoloty czy balony, a czasem też krążą po orbitach okołozemskich. Dysponujemy więc množstwem danych umożliwiającym coraz lepsze poznanie zasad przepływu energii wewnątrz systemu (między atmosferą, oceanem, litosferą i kriosferą), a także informacjami o ilości energii słonecznej docierającej do Ziemi oraz o ilości energii uciekającej z Ziemi w kosmos. Dzięki temu możemy dość dokładnie opisać bilans energetyczny Ziemi (jeśli chcesz przypomnieć sobie wiadomości na jego temat, zajrzyj do rozdziału 1.) i zidentyfikować przyczyny jego zaburzenia.

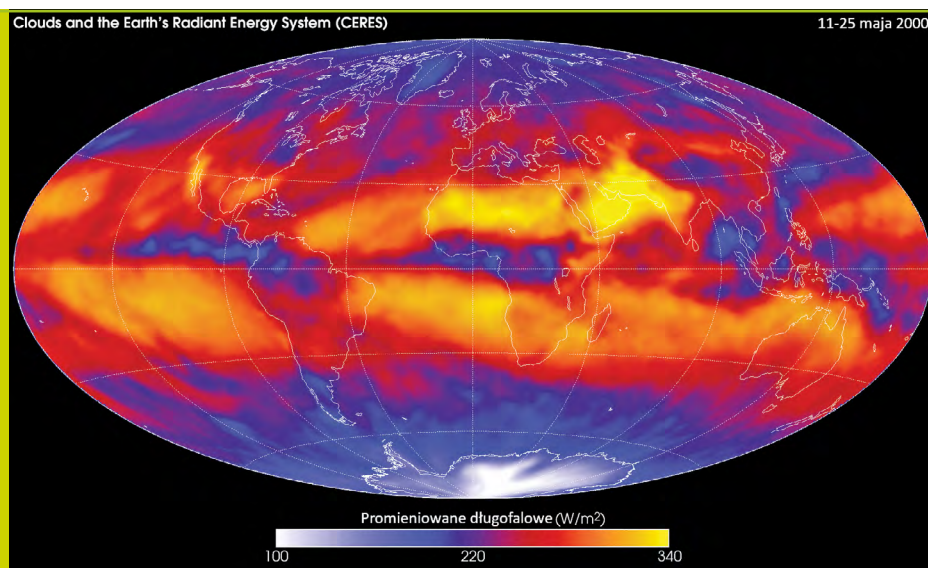
ATMOSFERA EMITUJE MNIEJ ENERGII W KOSMOS

Jak wiesz z rozdziału 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 okołozemskiej od lat 80. ubiegłego wieku, między innymi w ramach misji ERBS i CERES (np. Harries i in., 2001; Allan i in., 2014), (ilustracja 5.1.1.).

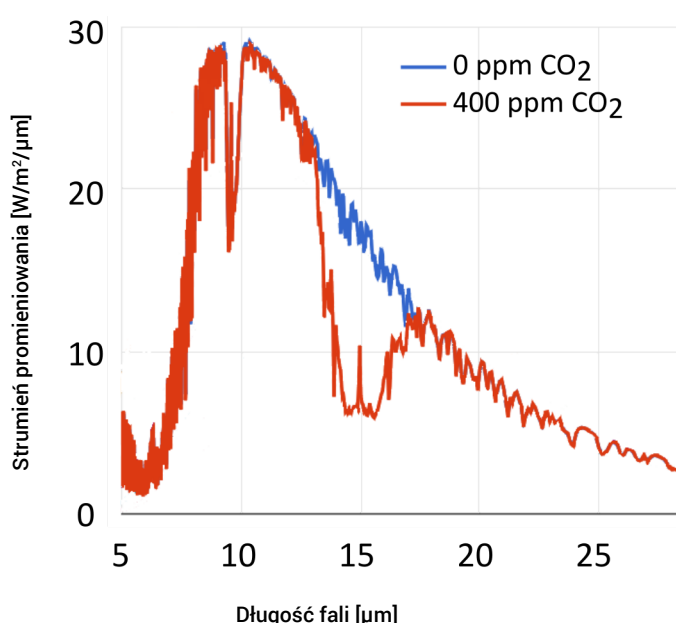
Ilustracja 5.1.1. Przykład pomiarów promieniowania długofalowego wychodzącego z atmosfery ziemskiej wykonanych przez przyrząd CERES z satelity Terra: średni strumień promieniowania w poszczególnych regionach w dniach 11–25 maja 2000 roku.

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 podrozdziale 3.2., 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 odgrywają tu zasadniczą rolę. 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).



Ilustracja 5.1.2. Widmo promieniowania atmosfery, czyli wykres strumienia promieniowania emitowanego przez nią dla różnych długości fali (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 fali 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 fali 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 międzyzworotnikowego 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 powinien powodować zwiększenie strumienia promieniowania podczerwonego skierowanego w stronę powierzchni Ziemi (ilustracja 5.1.2.; zajrzyj też do rozdziału 1.). Występowanie tego efektu również zostało potwierdzone pomiarami. Naukowcy (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, skupialiśmy się na zjawiskach zachodzących w jej najniższej warstwie (kilku lub kilkunastu kilometrów od powierzchni Ziemi). Wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje jednak zmiany także w wyższych jej partiach.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

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



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH

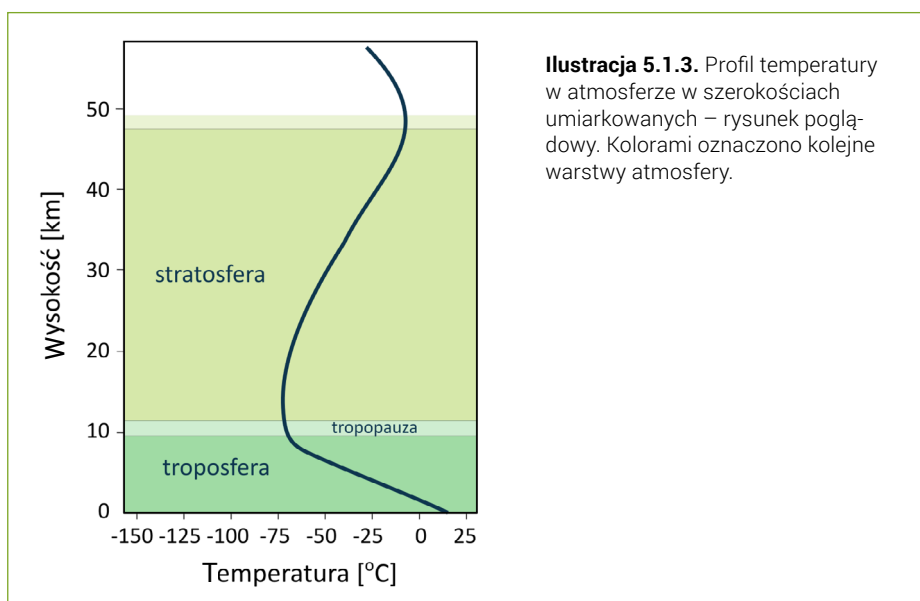
CZY WIESZ, ŻE ?

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

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).

Ze względu na to, jak wraz z wysokością zmienia się temperatura powietrza, w atmosferze można wyróżnić (ilustracja 5.1.3.):

- troposferę – warstwę najniższą, w której (średnio rzecz biorąc) temperatura spada z wysokością (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, którym towarzyszy uwalnianie energii do otoczenia);
- kolejne warstwy.

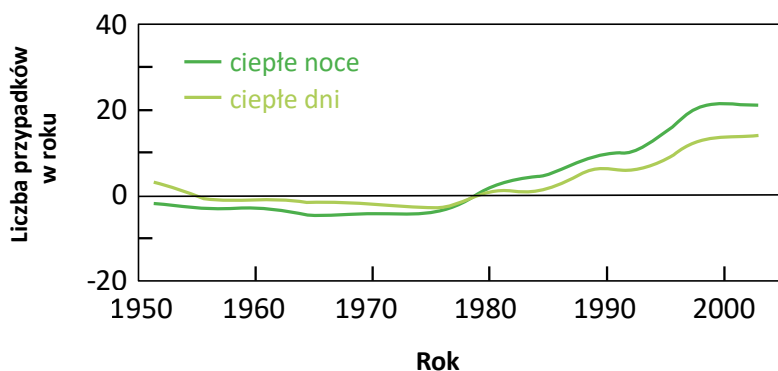


Ilustracja 5.1.3. Profil temperatury w atmosferze w szerokościach umiarkowanych – rysunek poglądowy. Kolorami oznaczono kolejne warstwy atmosfery.

Kiedy zmianę klimatu powoduje wzrost koncentracji gazów cieplarnianych, wzrost średniej temperatury powinien występować w troposferze. W stratosferze natomiast powinno dochodzić do ochłodzenia, ponieważ zwiększona zawartość gazów cieplarnianych przy powierzchni Ziemi silniej osłania wyższe partie atmosfery przed dostępem ogrzewającego je promieniowania ziemskiego. I tak się dzieje – to kolejny efekt potwierdzony przez wyniki pomiarów zdalnych (satelitarnych i z powierzchni Ziemi) oraz badań z użyciem rakiet i balonów meteorologicznych (Ramaswamy i in., 2001; Ramaswamy i in., 2006).

CIEPŁYCH NOCY PRZYBYWA SZYBCIEJ NIŻ CIEPŁYCH DNI

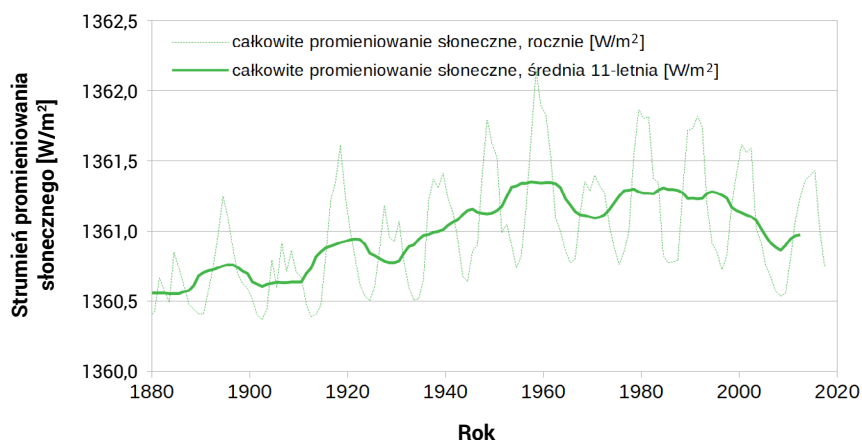
O tym, że za zmianę klimatu odpowiada czynnik działający przez całą dobę (tak jak gazy cieplarniane), świadczy wzrost częstości występowania ciepłych nocy, który jest szybszy niż wzrost częstości występowania ciepłych dni (Alexander i in., 2006; Hartmann i in., 2013), (ilustracja 5.1.4.). W przypadku ciepłych nocy średni trend w latach 1951–2010 wyniósł 4,3% na 10 lat, a w przypadku ciepłych dni ok. 2,9% na 10 lat (Hartmann i in., 2013; na podstawie bazy GHCNDEX; Donat i in. 2013).



Ilustracja 5.1.4. Zmiany liczby ciepłych dni i nocy w ciągu roku – dane wygładzone przez użycie dziesięcioletniej średniej biegnącej. 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% najwyższych (dla tego dnia w roku) w latach 1961–1990.
Na podstawie: Alexander i in., 2006.

AKTYWNOŚĆ SŁONECZNA NIE ROŚNIE

Jak wiesz z rozdziału 1., ocieplenie klimatu mogłoby być spowodowane wzrostem ilości energii docierającej do Ziemi ze Słońca. Pomiar prowadzone z użyciem satelitów wskazują jednak, że takie zjawisko obecnie nie zachodzi (Kopp i Lean, 2011), (ilustracja 5.1.5.), podczas gdy wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi postępuje. Między rokiem 1750 a 2011 udział czynników związanych z działalnością człowieka przyczyniających się do ocieplenia klimatu był ok. 46 razy większy niż zmian aktywności słonecznej (IPCC, 2013).



Ilustracja 5.1.5. 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 szara linia przedstawia średnie roczne, a gruba zielona – dane wygładzone poprzez zastosowanie 11-letniej średniej biegnącej. Jak widzisz, aktywność słoneczna podlega fluktuacjom w cyklach około jedenastoletnich. Wygładzenie wykresu pozwala łatwiej zauważyć, jak aktywność zmienia się z cyklu na cykl.

OGRZEWA SIĘ OCEAN

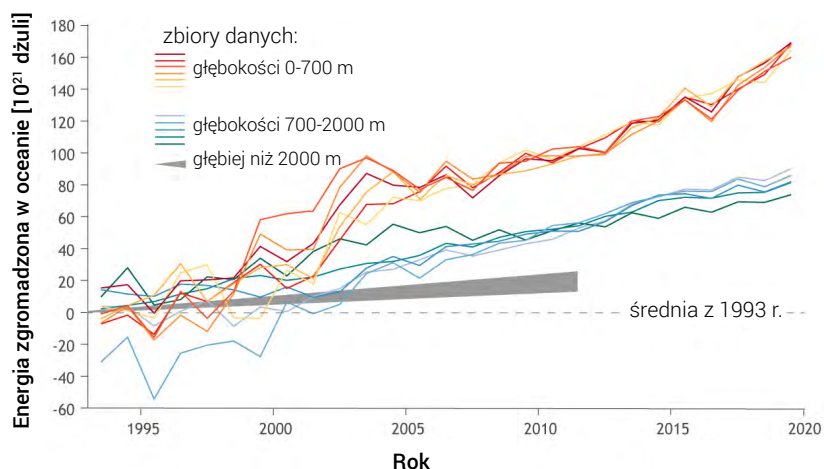
Wzrost średniej temperatury atmosfery mógłby być powodowany także przepływami energii wewnątrz ziemskiego systemu klimatycznego – na przykład uwalnianiem ciepła z oceanu. W takim przypadku jednak średnia temperatura samego oceanu (pozbywającego się energii) powinna spadać, tymczasem prowadzone na całym świecie pomiary temperatury wody wskazują, że również ocean się ogrzewa (Levitus i in., 2012; IPCC, 2013), (ilustracja 5.1.6.). 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 wypuszczane w ramach międzynarodowego programu Argo.

Ilustracja 5.1.6. Średnia roczna ilość energii zgromadzonej w oceanie porównana do średniej z roku 1993, obliczana na podstawie pomiarów temperatury oceanu na różnych głębokościach (im wyższa temperatura, tym więcej zgromadzonej energii). Wykres przedstawia zbiory danych z różnych opracowań. Linie w kolorach pomarańczowych i czerwonych odpowiadają warstwie 0–700 metrów głębokości, zielone i niebieskie – warstwie 700–2000 metrów, a dane z większych głębokości przedstawiono jako szare pasmo. Wykres za NOAA, 2021.

Źródło: NOAA/NESDIS/NCEI Ocean Climate Laboratory.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Jak i po co mierzymy temperaturę oceanu?

Program Argo sięga głęboko
oraz film

Zrozumieć kontrowersje wokół globalnego ocieplenia:
Zgodność dowodów

Znajdziesz tam przetłumaczony na język polski kurs internetowy Denial 101x, przygotowany przez University of Queensland i opublikowany pierwotnie na platformie edukacyjnej edX. Kurs pomaga zrozumieć metody stosowane przez osoby negujące naukę i uczy, jak przekazywać informacje naukowe.



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

PODSUMOWANIE

Jak wiesz z poprzednich rozdziałów, zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze rośnie. Wszystkie wymienione obserwowane współcześnie zjawiska wskazują, że to właśnie ten czynnik jest przyczyną rejestrowanego obecnie wzrostu średniej temperatury powierzchni Ziemi. Dane naukowe, którymi dysponujemy, nie pozwalają na powiązanie tego zjawiska z takimi czynnikami, jak zmiany aktywności słonecznej czy przepływy energii wewnątrz systemu klimatycznego.

Własności gazów cieplarnianych pod względem oddziaływania z promieniowaniem podczerwonym zostały potwierdzone doświadczeniami laboratoryjnymi już w XIX wieku (Tyndall, 1872). Jest niezwykle mało prawdopodobne, by istniał nieznaną 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 potrafią określić mechanizm, w wyniku którego wzrost koncentracji gazów cieplarnianych powoduje ocieplenie klimatu. Zjawiska towarzyszące obserwowanej współcześnie zmianie klimatu potwierdzają tezę, że właśnie z tym mechanizmem – nasilaniem się efektu cieplarnianego – mamy obecnie do czynienia.

5.2. 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 poprzedniego rozdziału już wiesz, że działania człowieka prowadzą do emisji gazów cieplarnianych. Można by jednak zapytać, skąd mamy pewność, że to właśnie one (a nie naturalne zjawiska) spowodowały wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze? Odpowiadamy, skupiając się na dwutlenku węgla, który w największym stopniu odpowiada za obserwowane ostatnio ocieplanie się klimatu.

KORELACJA CZASOWA

Pomiary koncentracji gazów cieplarnianych (współczesne – instrumentalne, dla dawniejszych czasów – 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), (ilustracja 5.2.1.). Tak gwałtowna zmiana wskazuje na związek nasilania się efektu cieplarnianego wraz z rozwojem przemysłu i rolnictwa.

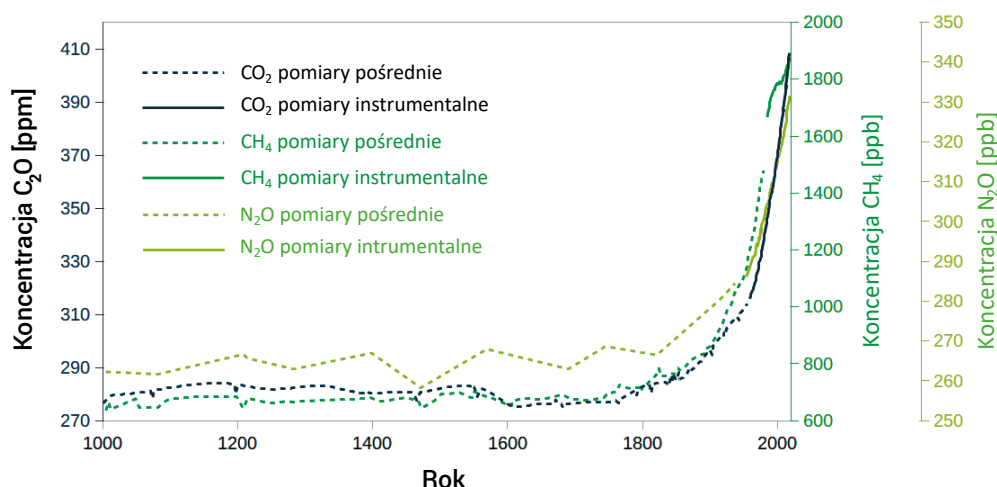
Więcej na temat cykli epok lodowych i interglacjałów przeczytasz w artykule na stronie www.naukaoklimacie.pl

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 www.naukaoklimacie.pl:

Paleoklimatologia: o co w tym w ogóle chodzi?



Ilustracja 5.2.1. 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.

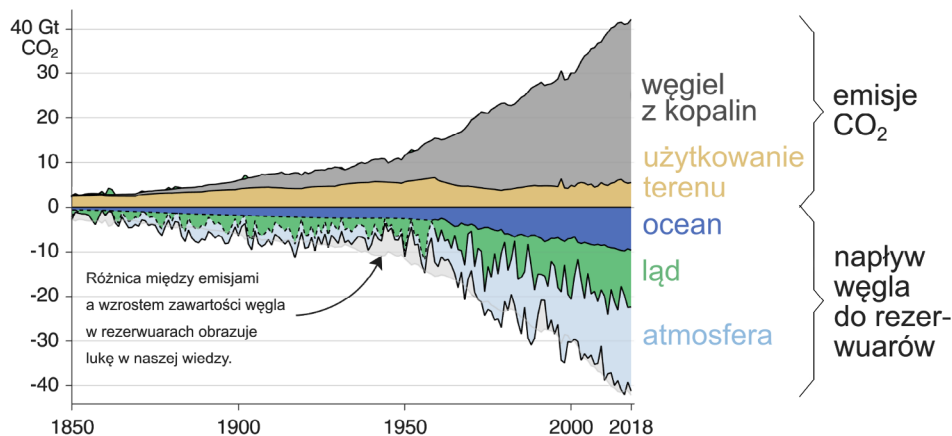
Dane skompilowane przez EPA, 2016 oraz WMO, 2017, 2018, 2019.

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 CO_2 (i całkowitej zawartości węgla) w atmosferze.

Ilustracja 5.2.2. Zestawienie antropogenicznych emisji dwutlenku węgla (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 zawartości tlenu. Jest on bardzo niewielki, jednak zachodzi konsekwentnie i dowodzi, że wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze jest efektem reakcji spalania, czyli łączenia atomów węgla z atomami tlenu (Manning i Keeling, 2006; Ciais i in., 2013).



Wyniki stężeń tlenu w atmosferze znajdziesz na przykład na stronie Scripps O_2 Program: www.scrippsco2.ucsd.edu

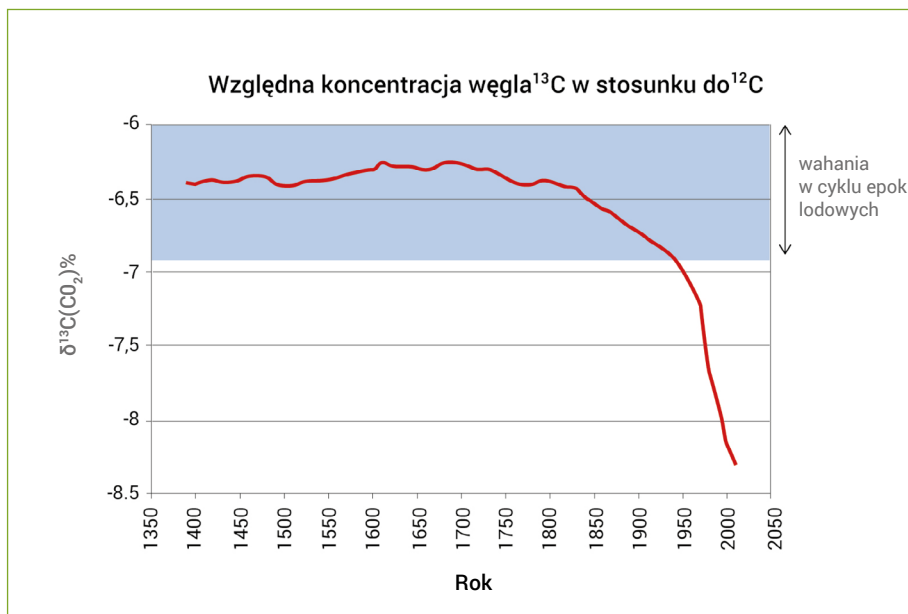
IZOTOPY

Atomy tego samego pierwiastka (np. 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 neutronów to różne izotopy tego samego pierwiastka.** Na przykład węgiel powszechnie występuje w postaci z 6 neutronami (^{12}C , gdzie 12 oznacza masę jądra w jednostkach masy atomowej, czyli 12u), 7 neutronami (^{13}C), 8 neutronami (^{14}C).

SKŁAD IZOTOPOWY WĘGLA W ATMOSFERZE

Węgiel na Ziemi ma najczęściej postać izotopu ^{12}C (lżejszego) lub ^{13}C (cięższego). Masa atomów może wpływać na prawdopodobieństwo, z jakim biorą one udział w niektórych 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). Wskutek tego udział lżejszych izotopów węgla jest wyższy w organizmach żywych niż w atmosferze, oceanie i gazach wulkanicznych.

Jak wiesz z rozdziału 2., paliwa kopalne powstały ze szczątków żywych organizmów. To oznacza, że w ich składzie udział ^{12}C jest również podwyższony. Jeśli wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze jest efektem spalania paliw kopalnych, to udział lekkiego izotopu węgla w atmosferycznym CO_2 powinien rosnąć. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych pomiarów. Jak widać na ilustracji 5.2.3., epoka przemysłowa przyniosła zdecydowaną zmianę we względnej zawartości ^{13}C i ^{12}C (na stronie Scripps CO_2 Program znajdziesz również informację o tym, że zawartość lekkiego izotopu węgla w atmosferze stale rośnie).



Ilustracja 5.2.3. 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 ANI OCEANY CZY EKOSYSTEMY LĄDOWE

Jak wiesz z rozdziału 2. dotyczącego cyklu węglowego, w naturze występują naturalne źródła dwutlenku węgla. Pomiary wskazują jednak, że to nie one są źródłem wzrostu koncentracji tego gazu 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 opublikowanym na stronie www.naukaoklimacie.pl:

CO_2 z wulkanów – jak to się mierzy?

TO NIE OCEAN

Gdyby ocean był źródłem CO₂ w atmosferze, to ilość zgromadzonego w nim dwutlenku węgla powinna spadać w miarę oddawania tego gazu 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 na stronie www.naukaoklimacie.pl:

- **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 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. Przyglądając się jednak temu zjawisku z perspektywy globalnej, 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 na stronie www.naukaoklimacie.pl:

- **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 ma bezpośredni związek z działalnością człowieka. Jest niezwykle mało prawdopodobne, by istniało nieznane dotąd źródło dwutlenku węgla, emitujące go dokładnie tyle, ile powinno być emitowane w efekcie spalania paliw kopalnych, a jednocześnie niwelujące w jakiś zagadkowy sposób ilość CO₂ o pochodzeniu antropogenicznym.

5.3. Mity klimatyczne

Nieprawdziwe komunikaty na temat zmiany klimatu często wynikają z błędów logicznych.

Obecny stan wiedzy naukowej i wynikający z niego powszechny konsensus dotyczący aktualnej zmiany klimatu sprawiają, że podważanie merytorycznych podstaw tej wiedzy nie ma sensu. Ciągłe jednak wiele osób i grup jest zainteresowanych szerzeniem opinii sprzecznych z wiedzą naukową. O tym, czym jest negacjonizm klimatyczny, jaką ma historię i skąd się wzięła tzw. maszyna zaprzeczania, przeczytasz szczegółowo w kolejnym rozdziale.

Dezinformacja jest częstym problemem w Internecie i różnego rodzaju mediach. Pojawiają się liczne, łatwo rozpowszechniające się mity na temat zmiany klimatu, powtarzane przez niektórych często w dobrej wierze. Z tej części podręcznika możesz się dowiedzieć, jakie są najczęstsze błędy logiczne takich mitów 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 ziarnko prawdy uprawdopodobnia fałsz. Na przykład: z przesłanki, że w przeszłości klimat zmieniał się z przyczyn naturalnych (prawda), nie wynika, że obecna zmiana jest pochodzenia naturalnego (fałsz).

Co więcej, takie rozumowanie pomija kluczowe szczegóły, jak skale czasowe lub zasięg geograficzny zjawisk. Można na przykład spotkać opinię, że skoro kiedyś przyroda i świat radziły sobie ze zmianą klimatu, to także teraz nie ma powodów do obaw.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Nauka o klimacie.
Fakty i mity**



NAUKA O KLIMACIE
DLA SKEPTYCZNYCH

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

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Klimat dawnych epok:
wielkie wymierania**

**Mit: wulkany emitują więcej
dwutlenku węgla niż człowiek**



- Po pierwsze, nie we wszystkich przypadkach można powiedzieć, że przyroda wyszła ze zmian klimatu bez szwanku, na przykład 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.
- Po drugie, prehistoryczne zmiany klimatu rozgrywały się w dużo dłuższych skalach czasowych – wyjście Ziemi z ostatniej epoki lodowej oznaczało wzrost średniej temperatury o 3–3,5° w ciągu ok. 8 tysięcy lat (Shakun, 2012), co dawało żyjącym na niej 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 doszło do ich spadku i średnia globalna temperatura była niższa niż dziś (Mann i in., 2009).

Jak zatem widać, 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 wyciągane na tej podstawie są zatem nieuprawnione logicznie. Niestety, są też bardzo perswazyjne, zwłaszcza jeśli służą potwierdzaniu światopoglądu, który ktoś już wcześniej posiadał, czy uspokajaniu samego siebie, że nie ma powodów do zmartwienia.

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 podane informacje. Można na przykład spotkać mit głoszący, że antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych nie mają znaczenia dla klimatu, ponieważ wulkany emitują więcej dwutlenku węgla niż człowiek. Jest to błędne twierdzenie, nieposiadające potwierdzenia w żadnych badaniach naukowych: w rzeczywistości ludzie emitują w ciągu roku ponad 100 razy więcej CO₂ niż wszystkie wulkany znajdujące się na kuli ziemskiej.

Wybieranie wisienek

Technika wybierania wisienek polega na wyselekcjonowaniu tylko małego wycinka informacji na dany temat – takiego, który stanowi najlepsze poparcie dla promowanej tezy, a pomijaniu całej reszty argumentacji. Może to polegać na przykład na podkreślaniu, że wybrany lodowiec rośnie, przy jednoczesnym pomijaniu faktu, że obecnie obserwowany jest ogólny spadek masy lodowców znajdujących się na Ziemi.

Przedstawianie fałszywej dychotomii

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

Promowanie fałszywych ekspertów

Negacjoniści klimatyczni celowo wyszukują i nagłaśniają wypowiedzi różnych osób sprzeczne z konsensusem naukowym. Wielokrotne przytaczanie opinii podważających wyniki badań sprawia, że zaczynają być one odbierane jako równie wiarygodne jak fakty podawane przez środowisko naukowe.

Stawianie nierealistycznych wymagań naukowcom

Istotą podejścia naukowego jest precyzja, dlatego najczęściej rezultaty badań naukowych, zwłaszcza opartych na modelowaniu, podaje się z odpowiednim zakresem niepewności, a wyniki pomiarów – z uwzględnieniem potencjalnego błędu pomiaru. Wymaganie stuprocentowej pewności od danych liczbowych uzyskiwanych w toku badań naukowych wynika z niezrozumienia ich natury.

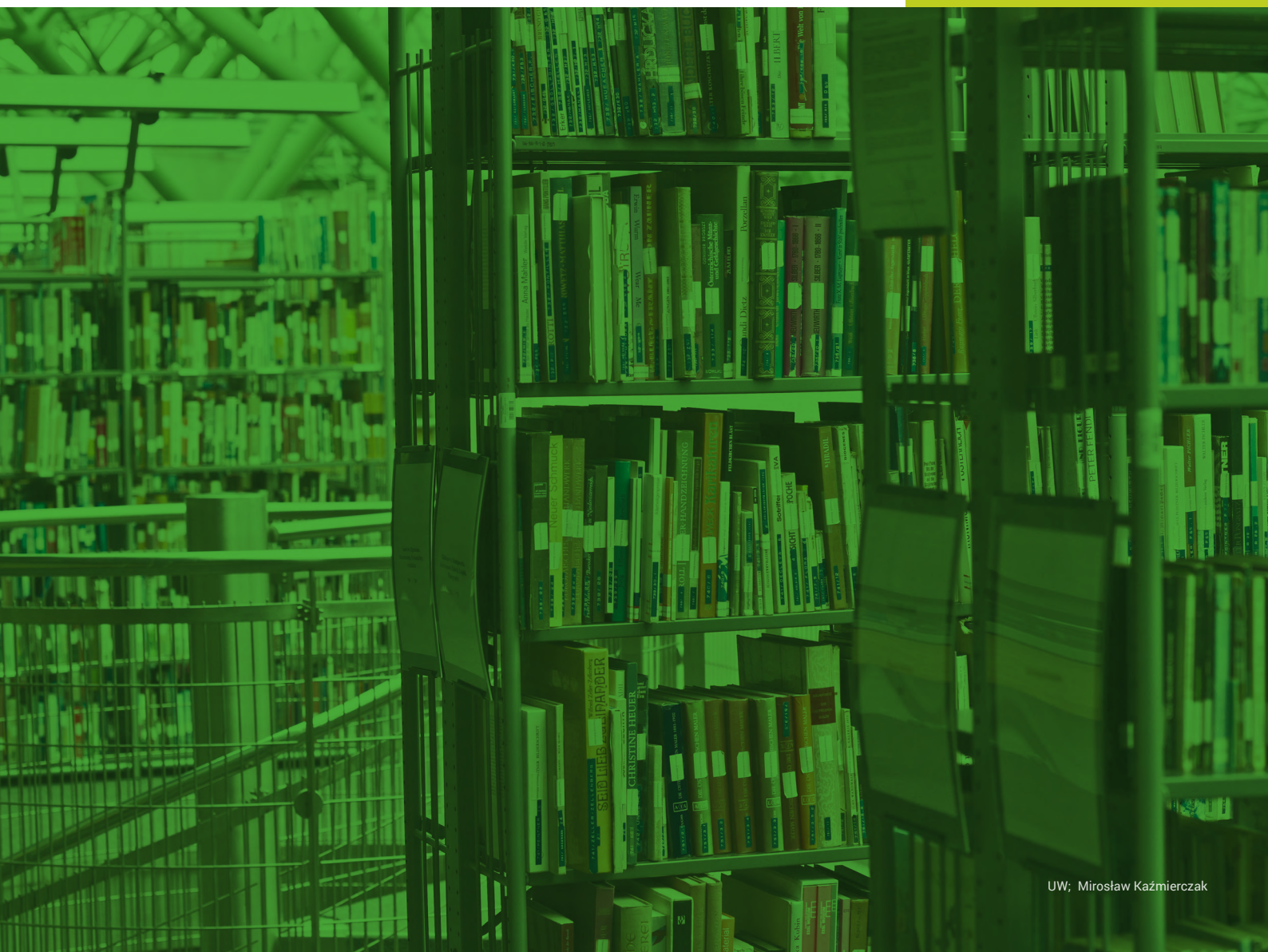
Wiara w teorie spiskowe

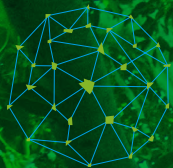
Rozdziewiek między konsensusem naukowym a opiniami wygłaszanymi przez negacjonistów może doprowadzić do tego, że ci ostatni stwierdzą istnienie wszechobecnego spisku. Udział w nim przypisują nie tylko środowisku naukowemu, ale także politykom czy instytucjom państwowym i międzynarodowym.



Więcej o odróżnianiu nauki od pseudonauki na stronie www.ken.pan.pl

Etyczne aspekty upowszechniania poglądów nienaukowych





KLIMATYCZNE
ABC

MAGDALENA BUDZISZEWSKA

ORCID 0000-0002-1837-2086, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

ORCID 0000-0001-7252-458, Uniwersytet Warszawski

ADRIAN WÓJCIK

ORCID 0000-0002-7073-6019, Uniwersytet Mikołaja
Kopernika w Toruniu

6. Co powstrzymuje 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 badań psychologii społecznej. Z rozdziału 6. dowiesz się, jakie mechanizmy stoją za zaprzeczaniem faktom naukowym dotyczącym zmiany klimatu, w jaki sposób kształtują się stanowiska wobec tego problemu w Polsce i na świecie, a także jakie postawy i paradoksy wiążą się z zachowaniami prośrodowiskowymi oraz dlaczego działania na poziomie indywidualnym nie wystarczą.

6.1. Zaprzeczanie zmianie klimatu. Jak to wyjaśnić?

Co to jest denializm klimatyczny?

Skąd się wziął? Jakiego 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.

W ostatnich latach denializm klimatyczny skupiał się na trzech różnych zagadnieniach:

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

Skoncentrowanie się na tych aspektach wynikało ze stanu wiedzy naukowej i z ogólnego kontekstu społeczno-politycznego w danym czasie (Dunlap i McCright, 2010). Reakcje na wymienione kwestie mogą przybierać trzy główne formy:

- **dosłownego zaprzeczania** (*literal denial*), czyli, innymi słowy, utrzymywania, że dane zjawisko w rzeczywistości nie zachodzi,
- **interpretacyjnego zaprzeczania** (*interpretive denial*), czyli przyjmowania faktów do wiadomości, ale nadawania im innego znaczenia,
- **implikacyjnego zaprzeczania** (*implicatory denial*), czyli zaakceptowania informacji na temat istnienia danego zjawiska, ale zaprzeczanie, że ma lub będzie miało ono wpływ na określoną jednostkę albo że może ona cokolwiek zrobić, aby temu zapobiec (Cohen, 2001).

Innym terminem szeroko używanym w literaturze jest **sceptycyzm klimatyczny**. Sceptycyzm był dominującą postawą wśród naukowców w czasach, gdy dostępne dowody na postępujące ocieplenie klimatu były niekompletne i proces



Definicję denializmu w języku angielskim możesz znaleźć na przykład tutaj: www.merriam-webster.com/dictionary/denial

ich gromadzenia dopiero się zaczynał, czyli na przełomie XIX i XX wieku (Weart, 2015). Dziś dopuszcza się pogląd, że denializm i sceptycyzm stanowią pewne kontinuum – od całkowitego zaprzeczania na jednym końcu do uogólnionego powątpiewania na drugim (Dunlap, 2013; Hobson i Niemeyer, 2012). Według niektórych autorów za sceptycyzm może uchodzić zaprzeczanie interpretacyjne i implikacyjne, kiedy ludzie dysponują wiedzą na temat zmiany klimatu, ale uzasadniają ją przyczynami naturalnymi i nie postrzegają jej jako procesu, który można kształtować własnymi działaniami – takie postawy w populacji cieszą się dużym zainteresowaniem badaczy w dziedzinie nauk społecznych (np. Hobson i 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, w połączeniu 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. Ich przedstawiciele zwracali uwagę na negatywne skutki wzrostu ekonomicznego, przede wszystkim na degradację środowiska naturalnego. Postulowali wprowadzenie ogólnych regulacji dla przemysłu mających na celu ograniczenie skali zniszczeń i ochronę w dalszej perspektywie. Ruchy te 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 Stanów Zjednoczonych, odrodziły się ruchy konserwatywne. Ich członkowie byli przeciwni działaniom prośrodowiskowym, szczególnie ograniczeniom narzucanym przedsiębiorcom. Otwarte próby osłabienia wpływów progresywnych spotkały się jednak z dużym oporem społecznym. Wtedy konserwatyści skoncentrowali swoje wysiłki na podważaniu naukowych podstaw wiedzy o przyczynach zagrożeń dla środowiska.

UW; Mirosław Kaźmierczak

PYTANIE DO REFLEKSJI

Przeczytaj wypowiedź zamieszczoną 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?

NAJWAŻNIEJSZE ELEMENTY „MASZYNY ZAPRZECZANIA”

ZMIANIE KLIMATU

Przemysł paliw kopalnych i pokrewne korporacje. Jak wiesz z rozdziału 3., spalanie paliw kopalnych jest głównym źródłem emisji gazów cieplarnianych. Nic więc dziwnego, że przemysły węglowy i naftowy od początku miały największy udział w „maszynie zaprzeczania” zmianie klimatu (Dunlap i McCright, 2010, 2011). Działyły też na rzecz powstrzymania władz przed wprowadzeniem regulacji dotyczących kontroli emisji dwutlenku węgla. Z czasem przyłączyły się do nich inne korporacje i stowarzyszenia związane z przemysłem energetycznym, wydobywczym i produkcją, na przykład samochodów. Wszystkie razem mają wkład finansowy w „maszynę zaprzeczania” – sponsorują konserwatywne think-tanki i naukowców odrzucających konsensus klimatyczny, a także wspierają ataki na opowiadających się za nim uczonych oraz na Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu (IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change).

Konserwatywne think-tanki. Te, sponsorowane przez przemysł, konserwatywnych filantropów i fundacje, komitety doradcze zapewniają tło ideologiczne dla „maszyny zaprzeczania” (Dunlap i McCright, 2011). Ich wpływy są dodatkowo wzmacniane przez to, że niektórzy z fundatorów należą do świata nauki, na przykład fizyki (jak jest w przypadku Instytutu Marshalla). Think-tanki stanowią zaplecze instytucjonalne dla naukowców odrzucających konsensus klimatyczny, organizują konferencje i „warsztaty edukacyjne” dla polityków oraz opracowują i rozpowszechniają w mediach różnorodne materiały (raporty, notki i konferencje prasowe, nagrania, wywiady) podważające ustalenia konsensusu.

Naukowcy odrzucający konsensus klimatyczny. Badacze, którzy prezentują poglądy niezgodne z konsensusem naukowym, są powiązani z przemysłem, przychylnymi im politykami i konserwatywnymi think-tankami. Niektórzy z nich rzeczywiście zajmują się zmianą klimatu (np. Richard Lindzen), część pracuje w innych dziedzinach nauki, ale większość ma niewiele wspólnego z pracą badawczą. Choć w sumie jest ich niewielu, to aktywność tych nielicznych jest bardzo ważna dla konserwatywnych think-tanków, które powołują się na te opinie m.in. na wykładach i w wydawanych publikacjach. W porównaniu z pracami naukowymi opowiadającymi się po stronie konsensusu liczba takich artykułów oraz ich cytowań w recenzowanych czasopiśmie jest jednak znacząco niższa (Anderegg i in., 2009).

GLÓWNE STRATEGIE

Stwarzanie niepewności. Proces ten rozpoczął się w kręgach reprezentujących przemysł paliw kopalnych, do których następnie dołączyły ruchy konserwatywne, politycy i media – wszyscy z reguły odwoływali się do doniesień naukowców odrzucających konsensus klimatyczny. Jeden z reprezentantów tego środowiska Frank Luntz przygotował raport, który dotarł do szerokiej publiczności. Podkreślał w nim, że debata naukowa na temat zmiany klimatu nadal trwa i nie przynosi jednoznacznych wniosków. Wzywał do oczekiwania na zgromadzenie większej liczby faktów i zachęcał do stawiania dalszych pytań naukowcom. Co więcej, autorzy różnych publikacji dotychczasowe badania potwierdzające zmiany klimatu przedstawiali jako „śmieciową naukę” (*junk science*), a ich kry-



Warto zajrzeć do wykładu Naomi Oreskes **Historia denializmu** na platformie YouTube

tykę – jako prawdziwą naukę. Czasami oferowano inne wyjaśnienia globalnego ocieplenia, na przykład aktywność Słońca. Towarzyszyły temu ataki personalne na badaczy opowiadających się po stronie konsensusu, zarzuty korupcji w środowisku naukowym i spisku osób zaangażowanych w Międzyrządowy Zespół ds. Zmiany Klimatu. Takie wątki pojawiały się w pracach naukowców odrzucających konsensus klimatyczny (np. Lindzen, 2008) i osób niezwiązanych z nauką, reprezentujących konserwatywne think-tanki (np. Horner, 2008).

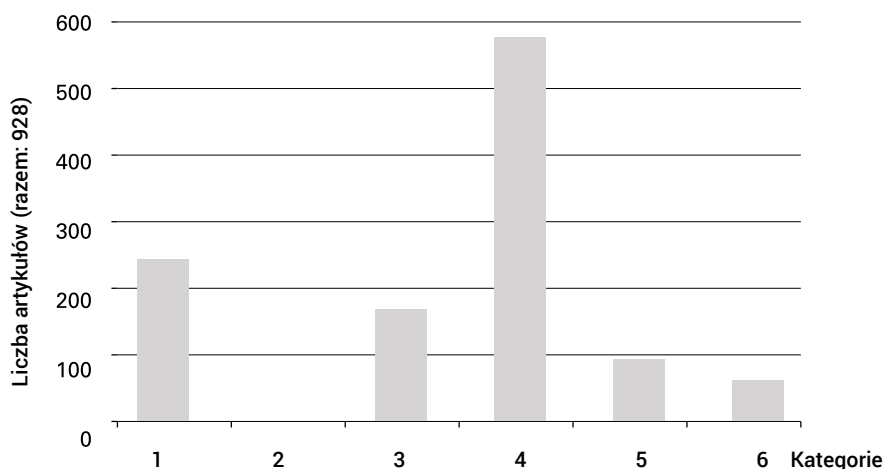
Rozpowszechnianie niepewności. Naukowcy odrzucający konsensus klimatyczny zyskali w mediach status ekspertów w dziedzinie zmiany klimatu. Byli w nich stale widoczni zgodnie z zasadą dopuszczania w debacie wszystkich głosów, co przyczyniało się do wywołania poczucia niepewności u niektórych odbiorców. Po pewnym czasie naukowcy odrzucający konsensus klimatyczny wypadli z głównego obiegu; wówczas skoncentrowali się na publikowaniu swoich tekstów w – nierecenzowanych – czasopismach nienaukowych. Edytorom i recenzentom czasopism naukowych zarzucali uprzedzenia wobec ich poglądów. Następnie ich publikacje zaczęły krążyć w Internecie, zyskując szerszy zasięg dzięki konserwatywnym blogerom, think-tankom i mediom społecznościowym.

Ważne! Powyższe informacje pochodzą głównie ze Stanów Zjednoczonych, skąd wywodzi się „maszynę zaprzeczania” zmianie klimatu i gdzie jej animatorzy pozostają najbardziej aktywni. Warto jednak podkreślić, że denializm klimatyczny obecny jest również w innych krajach, takich jak: Wielka Brytania, Kanada i Australia, i wyznawców tego poglądu nie brak, niestety, również w Polsce.

SKĄD WIEMY O „MASZYNIE ZAPRZECZANIA”?

W 2004 roku Naomi Oreskes, amerykańska historyczka nauki, zauważyła, że zmiana klimatu jest przedstawiana w mediach jako kontrowersyjne zjawisko, co do którego nie ma wśród naukowców zgody. Przeanalizowała 928 streszczeń (*abstracts*) artykułów poświęconych zmianie klimatu opublikowanych w renomowanych pismach naukowych w latach 1993–2003. Okazało się, że żadna z tych publikacji nie prezentowała stanowiska jawnie odrzucającego konsensus naukowy (ilustracja 6.1.1.). Praca Oreskes na ten temat ukazała się w *Science* – jednym z najbardziej prestiżowych czasopism naukowych na świecie – i cieszyła się dużym zainteresowaniem.

Ilustracja 6.1.1. Wyniki analizy streszczeń artykułów wymieniających globalną zmianę klimatu w słowach kluczowych. Artykuły podzielono na sześć kategorii: 1) jednoznacznie popierające konsensus, 2) jawnie odrzucające konsensus, 3) omawiające techniki pomiaru, monitorowania lub przewidywania zmiany klimatu, 4) omawiające potencjalne lub dokumentujące faktyczne skutki zmiany klimatu, 5) zajmujące się zmianami paleoklimatycznymi oraz 6) proponujące strategie mitygacyjne.



Z powodu tej publikacji autorka była atakowana – otrzymywała na przykład listowne groźby. Opowiedziała o tym Ericowi Conwayowi, historykowi z NASA. Zauważył on, że ataki pochodzą od grupy tych samych naukowców (fizyków), którzy kiedyś występowali przeciwko specjalście badającemu dziurę ozonową. Co więcej, osoby te posługiwały się wtedy tymi samymi argumentami – że naukowcy mają wiele wątpliwości i nie zgadzają się między sobą. Przedtem podobne ataki dotknęły też naukowców zajmujących się skutkami palenia tytoniu. W 2010 roku Oreskes i Conway opisali te ustalenia w książce *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming* (Handlarze wątpliwościami. Jak grupka naukowców kwestionuje prawdę – od skutków palenia tytoniu do globalnego ocieplenia). Udokumentowali w niej powiązania naukowców odrzucających konsensus klimatyczny z przemysłem i konserwatywnymi think-tankami, a także naświetlili ich strategię działania, takie jak dyskredytowanie nauki czy rozpowszechnianie fałszywych informacji.

POSTAWY WOBEC ZMIANY KLIMATU W STANACH ZJEDNOCZONYCH

McCright (2016) przeanalizował dane z serii badań ankietowych, które objęły blisko 13 tysięcy dorosłych osób w próbach reprezentatywnych dla populacji Stanów Zjednoczonych. Respondentki i respondenci odpowiadali na pytania o to, czy ich zdaniem klimat się zmienia i w jakim stopniu przyczynia się do tego używanie paliw kopalnych. Około 18% badanych uważało, że zjawisko zmiany klimatu nie występuje, a 21% – że paliwa kopalne nie przyczyniają się znacząco do zmiany klimatu.



Dodatkowo sprawdzono, na ile ankietowani ufają grupom i organizacjom związanym z przemysłem paliwowym, ochroną środowiska i nauką, czyli takim, które na co dzień dostarczają ludziom informacji na temat gospodarowania energią. Okazało się, że większe zaufanie dla przemysłu zwiększa prawdopodobieństwo sceptycyzmu (tym terminem posłużył się McCright) wobec zmiany klimatu i jej przyczyn antropogenicznych.

Rodzaje zaprzeczania można też sklasyfikować (za: Kundzewicz, 2013) według odpowiedzi na cztery podstawowe pytania zestawione na ilustracji 6.1.2. Jak widać, decydującym kryterium jest nie tylko poznawcza akceptacja faktów, ale także ich ewaluacja (czy ocieplenie nie będzie przypadkiem korzystne?), oraz postawa wobec konieczności działania (czy jest ono możliwe i potrzebne?).

Ilustracja 6.1.2. Rodzaje denializmu.
Za: Kundzewicz, 2013, s. 159.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Na każdym z tych etapów istnieją strategie wywoływania 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 różnych rodzajów zaprzeczania.

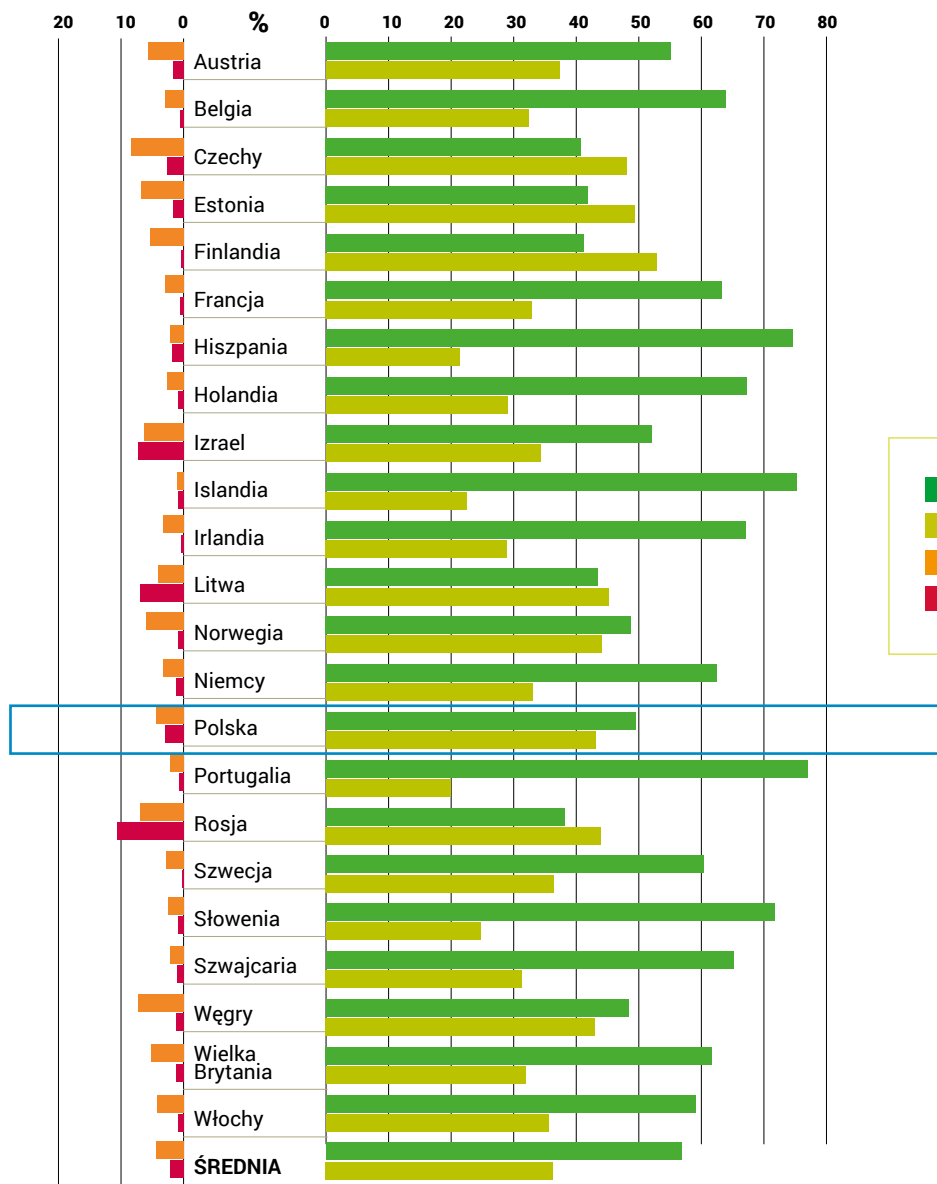
6.2. Postawy wobec zmiany klimatu w Polsce

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

Kiedy czytamy komentarze pod artykułami dotyczącymi zmiany klimatu, możemy odnieść wrażenie, że duża część czytelników nie zgadza się z ustaleniami nauki na ten temat. 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 tej kwestii. Co roku nie ma problemu z zebraniem bogatego zbioru takich wypowiedzi. Są to oczywiście tylko pojedyncze zdarzenia, ale bardziej pogłębione analizy wskazują, że odsetek przekazów medialnych, które zaprzeczają zmianie klimatu, bywa znaczny. Szacuje się na przykład, że około 47% filmów dotyczących tego problemu zamieszczonych w serwisie YouTube stanowią materiały podważające jego realność (Allgaier, 2019). Dodatkowo część prezentowanych informacji na temat zmiany klimatu świadomie wprowadza w błąd co do powszechnej zgody klimatologów w tej kwestii (Lewandowsky i in., 2015; Oreskes i Conway, 2010).

Jednocześnie, wnioskując na podstawie analizy treści przekazywanych za pośrednictwem mediów czy wypowiedzi publicznych, możemy przeszacować liczbę denialistów klimatycznych w społeczeństwie. Duża częstotliwość występowania takich wypowiedzi w mediach może wynikać z nieproporcjonalnie dużej aktywności tych osób.

Jak więc wygląda kwestia rozpowszechnienia poglądów negujących fakt postępującej zmiany klimatu? W ramach Europejskiego Sondażu Społecznego z 2016 roku – badania prowadzonego na reprezentatywnych próbach mieszkańców większości krajów europejskich – opracowano specjalny blok pytań dotyczący zmiany klimatu (European Social Survey ERIC, 2016). Pierwsze dotyczyło przekonania o realności problemu zmiany klimatu. Procentowy udział poszczególnych odpowiedzi przedstawiono na ilustracji 6.2.1.



Ilustracja 6.2.1. Przekonanie o realności problemu zmiany klimatu – European Social Survey, 2016 (opracowanie własne).

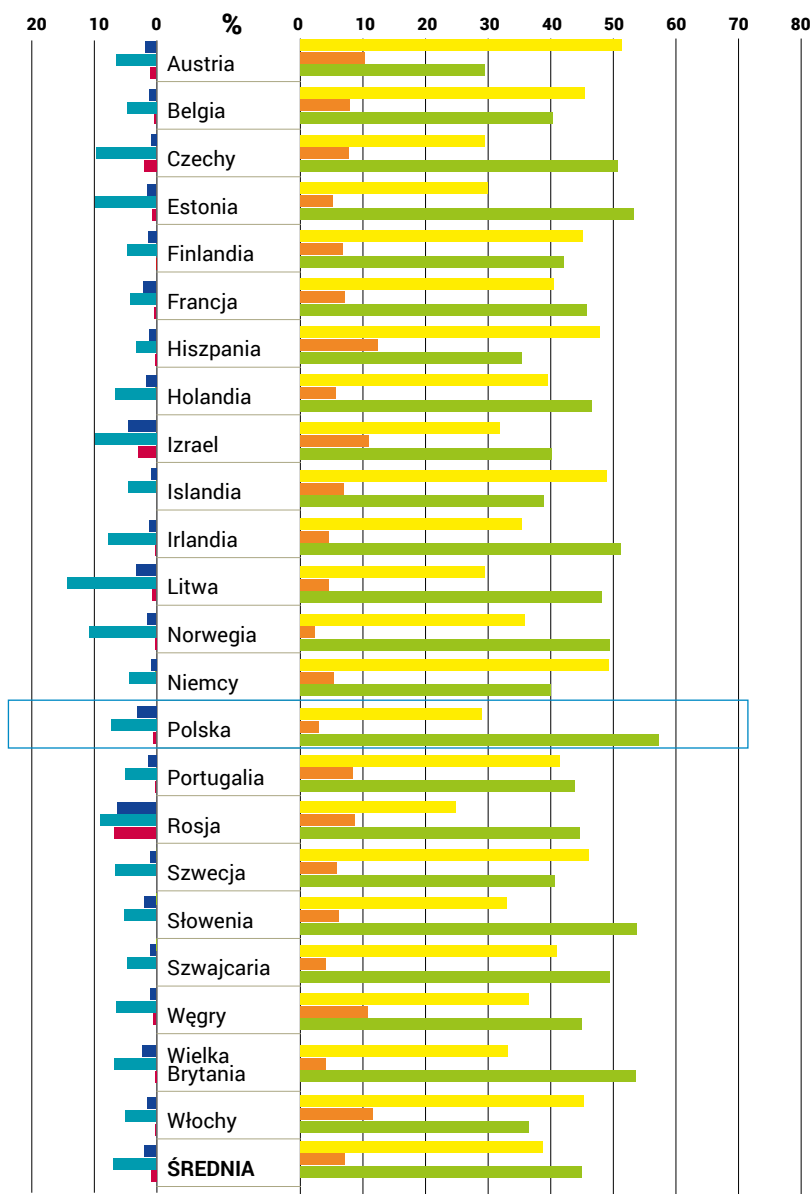
Być może zetknął się Pan/ zetknęła się Pani z poglądem, że klimat na Ziemi zmienia się ze względu na wzrost temperatury w ciągu ostatnich 100 lat. Jaka jest Pana/i osobista opinia w tej sprawie? Czy uważa Pan/i, że klimat na Ziemi się zmienia?

- na pewno się zmienia
- raczej się zmienia
- raczej się nie zmienia
- na pewno się nie zmienia

W większości krajów europejskich udział osób, które nie są przekonane do realności zjawiska zmiany klimatu, jest raczej niewielki i nie przekracza 10%. W Polsce udział denalistów klimatycznych wynosi 7,4%. Dane te są spójne z wynikami innych badań dotyczących świadomości ekologicznej Polaków (Wójcik i Byrka, 2016). Co więcej, wyniki publikowane przez bardzo różne ośrodki badania opinii publicznej wskazują, że odsetek ten jest mniej więcej stały w czasie (Gwiazda, 2016; Gwiazda i Kolbowska, 2009). Trochę bardziej złożony jest problem postrzegania przyczyn zmiany klimatu. Jak widać na ilustracji 6.2.2., większość Europejczyków uważa, że wpływ człowieka na kształtowanie zmiany klimatu jest większy niż zmiana wynikająca z procesów naturalnych. Udział osób, które negują zjawisko zmiany klimatu lub uważają, że jest ono spowodowane wyłącznie przyczynami naturalnymi, rzadko przekracza 10%. Zarazem jednak dość wysoki odsetek ludzi jest przekonanych o tym, że do zmiany klimatu przyczyniają się w równym stopniu procesy naturalne i działalność człowieka. W Polsce na przykład takie osoby stanowią zdecydowaną większość – 57,2% respondentów. Pogłąd taki jest niezgodny z wiedzą naukową, o czym wiemy już z rozdziału poświęconego mitom dotyczącym klimatu.

Ilustracja 6.2.2. Postrzeganie przyczyn zmiany klimatu – European Social Survey, 2016 (opracowanie własne).

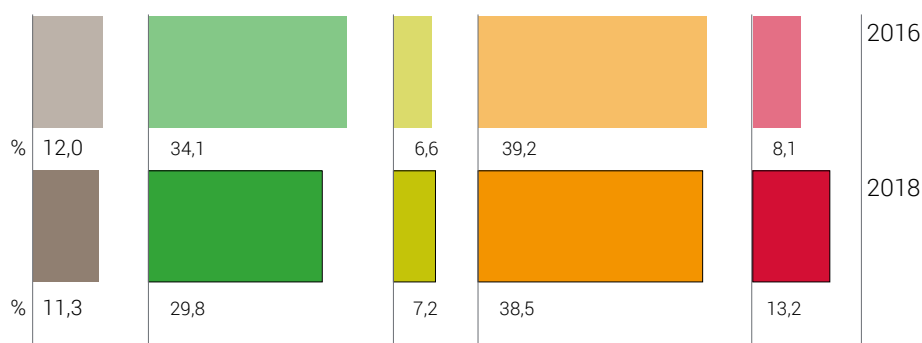
Czy uważa Pan/i, że zmiana klimatu jest spowodowana procesami naturalnymi, działalnością człowieka czy jednym i drugim?



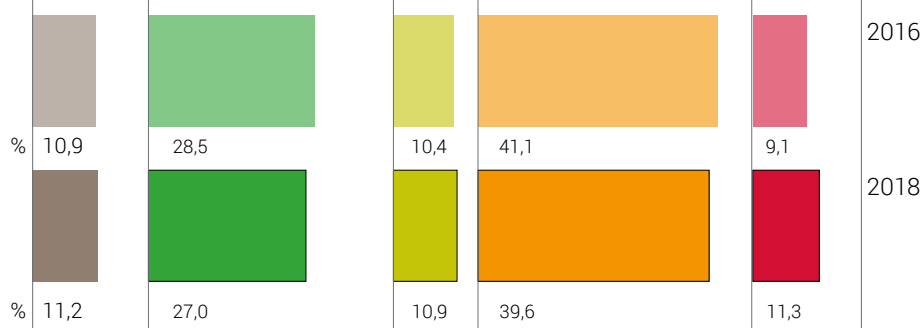
Badania opinii publicznej pokazują, że zarówno w Polsce, jak i w Europie mało jest osób, które w otwarty sposób deklarują przekonanie o niewystępowaniu zjawiska zmiany klimatu. **Zarazem jednak wiele osób wciąż nie rozumie, że największy wkład w zmianę klimatu wnosi właśnie człowiek.** Ten pogląd jest wykorzystywany w kampaniach negujących zmianę klimatu i to on powinien być w pierwszej kolejności wyjaśniany w dyskusji nad tym problemem.

Badania wskazują, że otwarte zaprzeczanie zmianie klimatu nie jest powszechne w polskim społeczeństwie. Brak działań na rzecz klimatu może jednak wynikać również z przekonania o tym, że zmiany są już tak bardzo zaawansowane, że nie da się z nimi nic zrobić. Prowadzone w latach 2016 i 2018 (Wójcik i Byrka, 2016, 2018) badania wykazały, że uważa tak około 40% polskiej populacji (ilustracja 6.2.3.). Może to stanowić wyzwanie dla działań mających na celu ochronę klimatu, dlatego że jednym z kluczowych ograniczeń jest brak poczucia ich skuteczności (Stern, 2012). Dyskusja o zmianie klimatu nie może więc ograniczać się do strony naukowej, powinna wskazywać kroki, które każdy z nas może podjąć, by w minimalnym chociaż stopniu powstrzymać ten proces (Heald, 2017).

... jest niemożliwa do powstrzymania



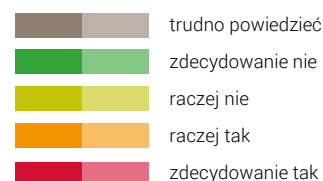
... jest już tak zaawansowana, że nie da się odwrócić jej skutków



Ilustracja 6.2.3. Udział osób, które w latach 2016 i 2018 uważały, że zmiany klimatu nie da się już zatrzymać.

Za: Wójcik i Byrka 2016, 2018; opracowanie własne. Badania na próbie reprezentatywnej (N = 800). Uczestnicy odpowiadali na pytanie:

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



Takiemu myśleniu towarzyszy 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 niebezpieczeństw o charakterze globalnym. Dwa inne to konflikty zbrojne (57% respondentów) i terroryzm (52%). Jest to pewna nowość, bo jeszcze do niedawna zmiany środowiskowe były postrzegane przez Polaków jako groźne, ale znacznie mniej istotne niż na przykład terroryzm (Roguska, 2014). Innymi słowy, respondenci 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 dowodzą, że zmiana klimatu jest wskazywana w większości z nich jako podstawowe zagrożenie na poziomie globalnym (Pew Research Center, 2019).

Warto dodać, że w przypadku Polski temu przekonaniu towarzyszy również poparcie dla rozwiązań systemowych, które miałyby ograniczać emisję gazów cieplarnianych. Z badań prowadzonych w naszym kraju wynika, że biorąc pod uwagę na przykład poparcie dla różnych form energetyki, jesteśmy najbardziej przychylni wzrostowi efektywności energetycznej oraz pozyskiwaniu energii ze źródeł odnawialnych (ilustracja 6.2.4.).

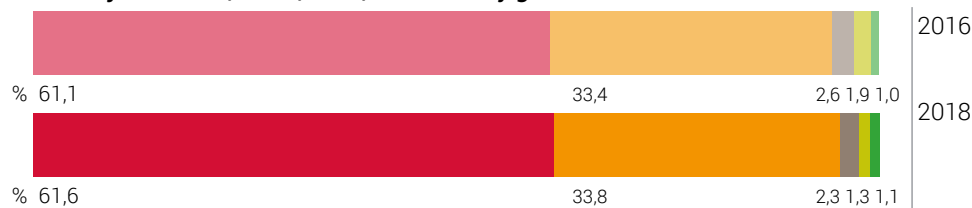
Ilustracja 6.2.4. Odsetek osób, które w latach 2016 i 2018 wypowiadały się na temat kierunków rozwoju energetyki.

Za: Wójcik i Byrka 2016, 2018; opracowanie własne. Badania na próbie reprezentatywnej (N = 1000). Uczestnicy odpowiadali na pytanie:

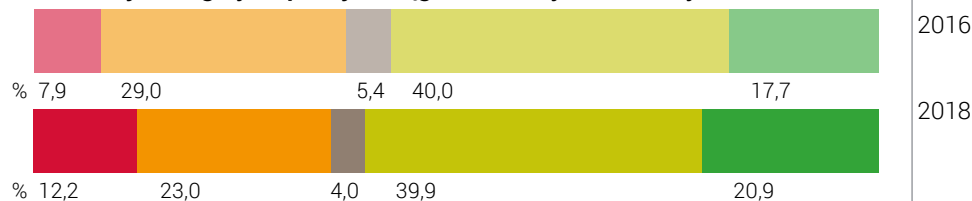
Jakie Pana/Pani zdaniem powinny być kierunki rozwoju polityki energetycznej w Polsce w perspektywie najbliższych 20 lat? Czy powinno się dążyć do...



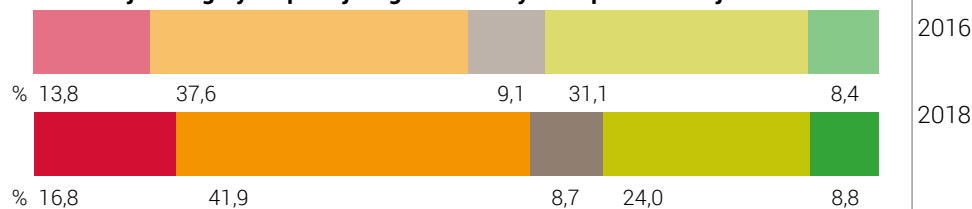
... zwiększania udziału energetyki opartej na źródłach odnawialnych, takich jak: Słońce, woda, wiatr, biomasa czy gaz



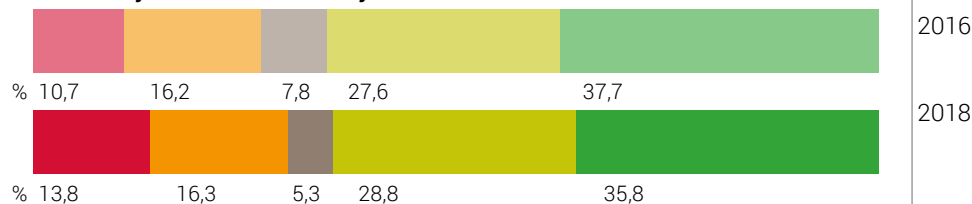
... rozwoju energetyki opartej na węglu kamiennym i brunatnym



... rozwoju energetyki opartej na gazie ziemnym i ropie naftowej



... budowy elektrowni atomowych



... lepszego wykorzystania i zmniejszania zużycia energii



Warto zajrzeć do filmu na platformie YouTube **Ziemia nie atakuje** dostępnego też na stronie www.ziemia nie atakuja.pl

Podsumowując, można stwierdzić, że tylko niewielka część Polaków w jasny sposób odrzuca dowody naukowe wskazujące na zmianę klimatu. Podobnie zdecydowana większość obywateli naszego kraju zdaje sobie sprawę z powagi zagrożenia, jakie niesie ze sobą zmiana klimatu. Tym, co rodzi jednak pewne zaniepokojenie, jest fakt, że duża część naszego społeczeństwa (ok. 40%) nie wierzy w możliwość zatrzymania postępujących zmian. Może to znacznie ograniczać skuteczność wezwań do działań prośrodowiskowych.

6.3. Jakie są bariery dla zachowań prośrodowiskowych?

Jaki jest związek między brakiem wiedzy a brakiem działania? Dlaczego namawianie do indywidualnych zmian proekologicznych rodzi różne paradoksy? Na jakie bariery fizyczne i psychologiczne napotyka mitygacja zmiany klimatu? Wyjaśniamy to w tym podrozdziale.

Jak już wiesz z podrozdziału 6.2., w większości krajów europejskich, w tym w Polsce, odsetek osób otwarcie zaprzeczających zmianie klimatu 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 – NISKI

Zaniepokojenie postępującymi zmianami klimatu ma zatem charakter globalny, zjawisko to budzi duży lęk także w Polsce. Poziom wiedzy Polek i Polaków na ten temat okazał się jednak niski. Tylko 38% osób pojmowało różnicę między zmianą klimatu a generalnym zanieczyszczeniem powietrza (smogiem); tylko 40% osób wiedziało, że obecna zmiana klimatu nie jest częścią naturalnego cyklu. Często błędnie sądzono, że dwutlenku węgla emitowanego przez ludzi jest tak mało, że najpewniej nie ma on wielkiego wpływu na klimat i że ocieplenie o 2 lub 3°C nie będzie miało istotnego znaczenia. Ludzie także powszechnie mylili zmianę klimatu z innymi kwestiami środowiskowymi, takimi jak nadmiar plastiku i problem zalegających śmieci. Błędne poglądy i mity dotyczące klimatu, o których mówiliśmy w poprzednim podrozdziale, są bardzo rozpowszechnione w polskim społeczeństwie, a zaniepokojeniu zmianą klimatu nie towarzyszy wiedza. Jeśli umiesz – Czytelniczko i Czytelniku – dokonać rozróżnienia między problemem zmiany klimatu a innymi problemami środowiskowymi, takimi jak smog czy nadmiar plastiku, a także zdajesz sobie sprawę, że potrzebują one różnych rozwiązań, to wiesz na ten temat więcej niż połowa polskiego społeczeństwa.

NAPIĘCIE MIĘDZY DZIAŁANAMI INDYWIDUALNYMI A ZMIANĄ SYSTEMOWĄ

Znaczny obszar niewiedzy dotyczy sfery rozwiązań. Powszechne jest przekonanie, a może i społeczna praktyka, że należy przede wszystkim namawiać ludzi do bardziej ekologicznych wyborów w życiu codziennym. Kiedy jednak sądzimy, że do powstrzymania zmiany klimatu wystarczy indywidualnie

Mitygacja zmiany klimatu – zespół wszystkich działań, które mają na celu ograniczenie globalnego ocieplenia, wpływając na przyczyny tego zjawiska. Najważniejszym z nich jest redukcja emisji gazów cieplarnianych.

Adaptacja do zmiany klimatu, w odróżnieniu od mitygacji, oznacza łagodzenie skutków zmian klimatycznych i przygotowywanie się do nich. Niektóre działania, jak na przykład mała retencja wody, zachowanie dużych drzew w miastach czy odtwarzanie gleb, są przykładami zarówno adaptacji – dzięki nim skutki suszy czy upałów będą bowiem dla ludzi mniej dotkliwe, jak i mitygacji – przyczyniają się do usuwania dwutlenku węgla z atmosfery albo spowalniają sprzężenia zwrotne związane z postępującym ocieplaniem się klimatu.



O tych mitach była mowa w poprzednim rozdziale tej książki.

Rozróżnieniu, ale i powiązaniom między smogiem a zmianą klimatu, przyjrzymy się w kolejnych rozdziałach. Dowiesz się z nich między innymi, dlaczego niektóre rozwiązania problemu smogu mogą nawet przyspieszyć proces zmiany klimatu.



Więcej na temat scenariuszy mitygacji zmiany klimatu i ograniczenia ocieplenia do 1,5 lub 2°C przeczytasz w kolejnych rozdziałach tej książki.

Więcej o rozwiązaniach systemowych przeczytasz w ostatnich rozdziałach tej książki.

oszczędzać wodę i unikać plastiku (a takie zachowania ekologiczne ludzie najczęściej wymieniają jako realne dla siebie), mijamy się z rzeczywistością. Takie zachowania, choć są z pewnością pożądane, 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 ze skali i horyzontu tego zjawiska. Klimat bowiem, jak wiemy z rozdziału 4., to dobro publiczne. Z całą pewnością łatwiej jest planować drobne zmiany w życiu codziennym niż wprowadzać zmiany systemowe. Te ostatnie wymagają bowiem wysiłku zbiorowego, co może być trudne w propagującej indywidualizm kulturze Zachodu. Wymaga też poczucia sprawstwa społecznego i politycznego oraz współpracy między różnymi grupami interesów i przemodelowania wielu dziedzin życia społecznego.

Konieczna przebudowa systemu powinna obejmować przede wszystkim:

- energetykę (odejście od paliw kopalnych i jednocześnie 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 niskoemisyjną, m.in. dzięki produkcji lokalnej),
- stosunek do przyrody, w tym przywracanie dzikich terenów.

Zależności między działaniami indywidualnymi i systemowymi są jednak złożone. Zmian systemowych nie da się wprowadzić bez powszechnego poparcia, a wiele z nich wymaga również zmian codziennych zachowań. Nawiązując do podanych przykładów, 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; w praktyce, jeśli nie zaczną się takiego systemu aktywnie domagać, jego powstanie w przyszłości jest mało prawdopodobne. Zmiany w dziedzinie energetyki można także przeprowadzić tylko przy jednoznacznym poparciu społecznym, być może nawet jedynie wtedy, gdy ludzie będą się tego domagać i będą gotowi ponieść konsekwencje takiej zmiany, na przykład w postaci wyższych kosztów 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 dotknęła głównie najsłabszych. Taka obawa budzi najsilniejszy opór. Jeśli znacząco rosną na przykład koszty energii, najsilniej uderza to w osoby, które dużą część swojego budżetu przeznaczają na rzeczy podstawowe, takie jak mieszkanie czy jedzenie. Rodzi się wówczas 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 zmiany klimatu. Wynika z tego, że związek mitygacji zmiany klimatu z poczuciem

sprawiedliwości i realnym problemem nierówności stanowi jedną z największych barier w poszukiwaniu skutecznych rozwiązań. Jednocześnie, przynajmniej na poziomie państw, takie problemy można rozwiązywać systemowo, na przykład stosując progresywne ceny za zużycie energii albo wdrażając zasadę zwracania części kosztów i inne rozwiązania ekonomiczne. Takie działania wraz z rozwojem technologii mogłyby przyczynić się do wprowadzenia w poszczególnych sektorach, na przykład w energetyce, rozwiązań globalnie dla społeczeństwa nawet korzystniejszych niż dotychczasowe. Wymaga to jednak woli zmiany i gotowości do zaakceptowania jej kosztów. Tymczasem nawet hipotetyczna zmiana na lepsze jest odbierana jako psychologicznie kosztowna i budzi opór.

Na tych przykładach widać, że **jakakolwiek zmiana, która naprawdę przyczyniłaby się do redukcji emisji gazów cieplarnianych, musi uwzględniać jednocześnie kilka składników: poparcie społeczne, tworzenie przemysłowych rozwiązań systemowych i współpracę pozwalającą na zmianę zachowań indywidualnych.**

PYTANIA DO REFLEKSJI

„Najpierw niech młodzież nauczy się gasić światło”.

„Lepiej jest zbierać śmieci w lesie niż protestować”.

„To konsumenci decydują”.

Często można usłyszeć takie wypowiedzi. Zastanów się, dlaczego koncentrowanie się na zachowaniach indywidualnych może być szkodliwe dla walki z katastrofą klimatyczną? Od czego odwraca to uwagę? A może się z tym nie zgadzasz?

Jedna z aktywistek klimatycznych powtarza: „Mówienie o plastiku zrobiło wiele złego dla klimatu”. Spróbuj wyjaśnić, dlaczego.

UW; Mirosław Kaźmierczak

GLÓWNE CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE INDYWIDUALNE ZACHOWANIA PROŚRODOWISKOWE

W poprzedniej części tego rozdziału mówiliśmy o tym, że indywidualne zachowania proklimatyczne w sferze prywatnej rodzą wiele paradoksów, choć z pewnością są potrzebne, zwłaszcza jako krok w stronę zmiany systemowej i jej powszechnej akceptacji. Dlatego teraz skupimy się na barierach, które utrudniają podejmowanie tego typu działań.

W uproszczeniu można przyjąć, że każde ludzkie zachowanie jest wynikiem interakcji między czynnikami osobistymi i zewnętrznym kontekstem (Guagnano i in., 1995). Do czynników osobistych zaliczamy własne przekonania, wierzenia i wyznawane wartości. Kontekst to najróżniejsze okoliczności społeczne, a także gospodarcze i polityczne. Ten sam kontekst często 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 zmuszamy do jakiegoś zachowania lub mu go zabraniamy; Stern, 2000). W praktyce oznacza to, że im jakieś zachowanie jest trudniejsze (np. kosztowniejsze) do wykonania, to w tym mniejszym stopniu zależy od czynników osobistych, chyba że jest przy tym odpowiednio wzmocnione przez kontekst (np. wymogiem prawnym).

Można więc sądzić, że zachowania o największym realnym oddziaływaniu na zmiany klimatu to zachowania, które słabiej zależą od czynników osobistych (w tym nawet np. od zaniepokojenia zmianą klimatu), a silniej od czynników zewnętrznych (Stern, 2000).

ZANIEPOKOJENIE A DZIAŁANIE

Badacze Hall, Lewis i Ellsworth (2018) przez rok śledzili postawy wobec zmiany klimatu 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 zmiany klimatu 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 przekonanie o zmianie klimatu zależy od pory roku – w ciepłych miesiącach badani raportowali wyższy poziom przekonania niż w okresach chłodniejszych.



Dla zainteresowanych:
www.apa.org

Psychology and Global Climate Change: Addressing a Multi-faceted Phenomenon and Set of Challenges



BARIERY STRUKTURALNE (na podstawie raportu APA; Swim i in., 2009)

Na przeszkodzie we wprowadzaniu w życie działań prośrodowiskowych stoją następujące bariery strukturalne:

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

Uważa się, że te bariery pozostają poza indywidualną kontrolą.

**BARIERY PSYCHOLOGICZNE** (za: Gifford, 2011)

Klasyczne bariery psychologiczne opisał profesor psychologii środowiskowej Robert Gifford i nazwał je **smokami braku działania** (*Dragons of Inaction*), wskazując aż 36 rodzajów takich barier. Smocza metafora ma pokazać, że są one realnymi przeciwnikami i że ich znajomość może pomóc w ich pokonaniu.

Bariery psychologiczne, jak się wydaje, powstają stopniowo. Najpierw prawdziwa niewiedza wyklucza podjęcie jakichkolwiek działań. Następnie, kiedy ktoś ma już świadomość problemu, różnorodne procesy psychologiczne ponownie powodują zaniechanie aktywności. W końcu, kiedy podjęte zostanie jakieś działanie, często okazuje się ono niewystarczające: nie jest kontynuowane dostatecznie długo, by spowodować zmianę zachowania na stałe albo jego skutki są przeciwne do zamierzonych. Mają na to wpływ wymienione niżej bariery.

Ograniczone zdolności poznawcze (*limited cognition*) – w toku ewolucji ludzki mózg (*ancient brain*) rozwinął się tak, aby zwracać uwagę przede wszystkim na najbliższe otoczenie w krótkiej perspektywie czasowej. Dlatego stosunkowo trudno myśleć nam o procesach zachodzących globalnie i w bardzo długich przedziałach czasowych. W wielu miejscach zmiana klimatu nie wpływa jeszcze wyraźnie na funkcjonowanie społeczeństwa, ludzie nie mają więc motywacji, aby przywiązywać większą wagę do czysto teoretycznego dla nich problemu (ów brak zainteresowania określa się po angielsku jako *environmental numbness*). W takich warunkach łatwo tkwić w niewiedzy (*ignorance*). Stąd bierze się nieświadomość istnienia problemu, brak wiedzy, skąd ten problem się wziął lub co można z tym zrobić. Dodatkowo niedostrzeganie związków między aktywnością ludzi a zmianą klimatu jest potęgowane przez sprzeczne wiadomości podawane w mediach. Czasami wiadomości te wręcz mają na celu dezinformację i szerzenie niepewności. Wiesz o tym z wcześniejszych części tego rozdziału. A niepewność (*uncertainty*) względem mechanizmów zmiany klimatu także powstrzymuje przed działaniem. Co więcej, ludzie wykazują tendencję do niedoceniań ryzyka (*judgmental discounting*) i tym samym do zbyt dużego optymizmu (*optimism bias*) w odniesieniu do wystąpienia danych skutków, na przykład 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 nawet jeśli coś zrobią, okaże się to niewystarczające. Poczucie braku kontroli i skuteczności własnych działań (*self-efficacy*) łączy się z fatalizmem, czyli przekonaniem, że nic już na to nie można poradzić.

Ideologie (*ideologies*) – światopoglądy (*worldviews*), jakie wyznają ludzie, kształtują 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, do tego są przekonani o nieograniczonej dostępności zasobów naturalnych i nie wierzą, że ich eksploatacja przyczynia się do dewastacji środowiska, nierzadko zaprzeczają wpływowi człowieka na zmianę klimatu. Jeśli wierzą

w siły nadprzyrodzone (*suprahuman powers*) i ich sprawczość, są przekonani, że dysponujący nimi bogowie tak czy inaczej zrobią to, co będą chcieli, lub że nie opuszczą ich w potrzebie. Na przykład niektórzy mieszkańcy wysp na Pacyfiku kupują ziemię w wyżej położonych rejonach, zdając sobie sprawę z tego, że ich domy zostaną zalane przez rosnący poziom mórz, a inni wierzą, że Bóg nie dopuści do nowego potopu po tym, który dokonał się w czasach biblijnych. Ci, którzy wysoko cenią możliwości, jakie dają nam nowe technologie, uważają, że nauka zaradzi zmianie klimatu (*technosavation*). Ci, którzy żyją w relatywnym dobrostanie, mają tendencję do bronięcia swojego *status quo* (*system justification*), nie chcą zaburzać tego stanu i nie chcą dopuścić do tego, by inni cokolwiek robili w tym kierunku. 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 tego, co jest działaniem szeroko przyjętym i tym samym odpowiednim. 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, że ludzie zauważają nierówności (*perceived inequity*). Zastanawiają się, dlaczego mieliby zmieniać swoje zachowanie, skoro inni tego nie robią. Częstym powodem braku działania są na przykład odniesienia do innych narodów czy państw, które nie ograniczają emisji.

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 używanie go jest szkodliwe dla środowiska, może doświadczyć dysonansu poznawczego. To nieprzyjemny, niepożądany stan, którego łatwiej się pozbyć poprzez zmianę nastawienia (samochody nie są aż tak szkodliwe) niż zachowanie (przesiąść się na rower czy wybrać publiczne środki transportu). Co więcej, powtarzane zachowanie (np. używanie samochodu) staje się nawykiem. Nawyki są niezwykle odporne na zmiany, a jeśli już im podlegają, trwa to 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 poczuciu, że nie zostaniemy wykorzystani. Zdarza się jednak, że obywatele nie ufają w tej kwestii władzom czy politykom. Równie ważnym czynnikiem jest wiara w to, że warto zaangażować się w działanie. Okazuje się to jednak niemal nieosiągalne w sytuacji, gdy pewne zachowania nie są obowiązkowe, czyli regulowane

prawnie, i można samemu decydować, czy się coś robi czy nie, bez jakichkolwiek przykrych 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 (np. 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 nie przynieść oczekiwanego rezultatu.

Ograniczone zachowanie (*limited behavior*) – wielu ludzi podejmuje przynajmniej minimalne działania, które pomagają w jakimś stopniu ograniczać emisje. Jednocześnie wiele osób zgadza się, że mogłyby robić więcej. Jedne zachowania są łatwiejsze do wprowadzenia niż inne, ale mają relatywnie małe znaczenie wobec globalnej katastrofy. Ich łatwość sprawia, że ludzie angażują się, podejmując w ten sposób wysiłek symboliczny (*tokenism*), zamiast decydowania się na bardziej kosztowne zachowania o większym wpływie. Bywa też tak, że nawet kiedy podejmą jakiś wysiłek, ich dalsze postępowanie przekreśla początkowy pozytywny efekt (*the rebound effect*), jak wtedy, gdy ktoś kupuje samochód bardziej przyjazny dla środowiska, ale jeździ nim częściej i dalej niż wcześniej.

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* (Co myślimy, kiedy staramy się nie myśleć o globalnym ociepleniu: psychologia działania na rzecz klimatu), wydanej w 2015 roku, przedstawił nową perspektywę spojrzenia na zachowania prośrodowiskowe. Na początku zauważył pewien paradoks: mimo konsensusu naukowego w kwestii zmiany klimatu i przyczyn tego zjawiska, ludzie wciąż nie podejmują wystarczających działań, by tę zmianę zatrzymać (a część z nich nadal w tę zmianę nie wierzy). Uznał to za ogromną porażkę komunikacyjną i opisał sposoby poprawienia przekazu, aby pokonać najpoważniejsze przeszkody, na przykład niektóre bariery psychologiczne. Rekomendował między innymi opisywanie zmiany klimatu jako przestrzeni bliskiej każdemu człowiekowi i nieoddalonej 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 rozpowszechniane treści powinny być inspirujące i stymulować wspólnotowość, bo mogą one lepiej rozbudzić gotowość do zmiany społecznej – skuteczniejszej niż działania jednostkowe.

Informowanie o zmianie klimatu – szczególnie w zwykłych, codziennych rozmowach z innymi – jest uznawane za jeden z najskuteczniejszych sposobów podtrzymywania zaangażowania, skłaniania do refleksji nad własnym zachowaniem i włączania w procesy zmiany społecznej (APS, 2019). Według Stoknesa rozwiązania oparte na pozytywnym przekazie obejmują:



Dla zainteresowanych:

<https://psychology.org.au/getmedia/88ee1716-2604-44ce-b87a-ca0408dfaa12/climate-change-empowerment-handbook.pdf>

- odnoszenie się do lokalnych społeczności i norm w nich obowiązujących, co pozwala wykorzystać naturalną ludzką skłonność do naśladowania innych (np. jeśli ktoś wie, że jego sąsiedzi oszczędzają energię, prawdopodobnie też zacznie to robić; ludzie szybko zauważają, co stanowi „normalne” zachowanie w określonych warunkach i chętnie sami się tak zachowują), (Cialdini, Reno i Kallgren, 1990), oraz wykorzystywanie osób uznawanych za wpływowe (np. powszechnie znanych aktorów czy celebrytów, ale też miejscowych liderów, szefów popularnych organizacji czy stowarzyszeń) do rozpowszechniania informacji (ta strategia sprawdziła się w kampaniach antynikotynowych w Stanach Zjednoczonych),
- przewagę pozytywnych emocji i uczuć w przekazie, czyli omawianie przyszłych innowacji technologicznych, możliwości stwarzania nowych, „zielonych” miejsc pracy, sposobów przygotowania się na zmianę klimatu oraz promocję zdrowia i utrzymywania dobrego samopoczucia – a wszystko to w kontekście wspólnych celów,
- prezentowanie bardziej ekologicznych wyborów jako najłatwiejszych w danej sytuacji,
- zastąpienie opowieści o nadchodzącej apokalipsie opowieściami o konkretnych wizjach „zielonej przyszłości”,
- stosowanie wskaźników „zielonego wzrostu” zamiast wskaźników postępowania katastrofy (takich jak emisje gazów cieplarnianych czy liczby wymierających gatunków zwierząt).

EDUKOWANIE ZAMIAST STRASZENIA

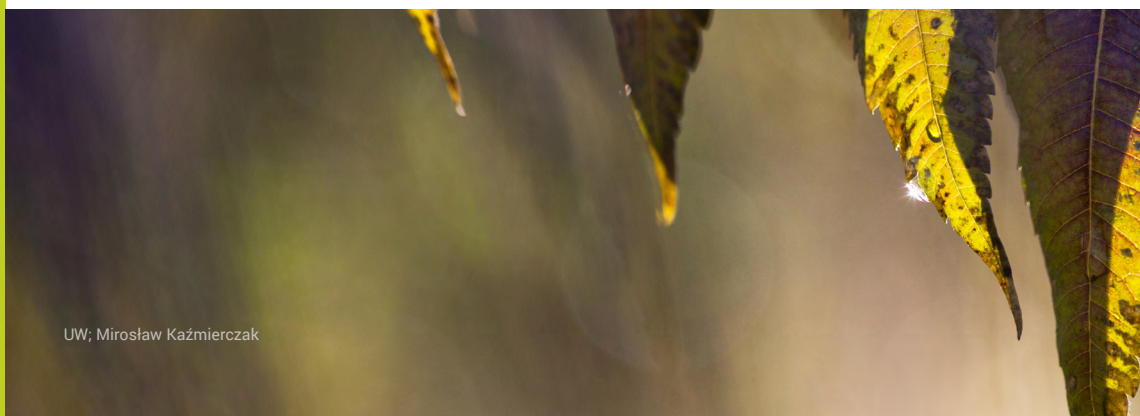
Znaczenie pozytywnej komunikacji wyłoniło się także ze wspomnianego już badania *Ziemia nie atakuje* (Kantar, 2019). Autorzy raportu podkreślili, że przekaz powinien być przede wszystkim zorganizowany wokół rozpowszechniania wiedzy, włączając w to ekonomiczne aspekty zachowań prośrodowiskowych (np. wynikające z nich oszczędności). Najważniejszym wnioskiem było stwierdzenie, że to właśnie wiedza na temat zmiany klimatu zwiększa gotowość do różnorodnych działań, takich jak:

- poparcie rozwiązań systemowych szczególnie istotnych dla realnego wpływu na klimat – aż 89% osób mających dużą wiedzę na ten temat 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 zrozumienia problemu, jest szansą na realne ograniczenie zmiany klimatu.

Warto zajrzeć do wykładu dr. Adriana Wójcika **Kto nie wierzy w zmianę klimatu i dlaczego?** na platformie YouTube.

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





KLIMATYCZNE
ABC

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

MAREK GIERGICZNY

ORCID 0000-0001-9110-3897, Uniwersytet Warszawski

7. Wpływ rozwoju gospodarczego na stan klimatu i przyrody

Tematem tego rozdziału są stanowiska ekonomistów wobec problemu emisji gazów cieplarnianych pochodzących z gospodarczej działalności człowieka. W środowisku ekonomicznym prezentowane są rozmaite poglądy i nie jest oczywiście możliwe omówienie tutaj ich wszystkich.

Stanowisko ekonomistów najczęściej widoczne w mediach koncentruje się na wzroście gospodarczym. Zgodnie z takim podejściem głównym celem polityki ekonomicznej państwa jest zapewnienie stałego, jak najwyższego tempa wzrostu gospodarczego, a znaczenie innych czynników ocenia się przede wszystkim przez pryzmat ich wpływu na tempo wzrostu produktu krajowego brutto (PKB). Nie brakuje jednak ekonomistów, dla których nadrzędne znaczenie ma fakt, że Ziemia jest przestrzenią ograniczoną fizycznie, a gospodarka człowieka stanowi jeden z wielu systemów jednocześnie funkcjonujących na naszej planecie. W tej perspektywie najważniejsze jest zapewnienie trwałości istnienia zarówno ludzi, jak i innych form życia na Ziemi oraz jakościowy rozwój oparty na optymalnym korzystaniu z ograniczonej puli zasobów.

W tym rozdziale omówimy stanowiska, które wyróżniają się w ekonomicznych dyskusjach na temat globalnego ocieplenia, oraz zarysujemy kontekst historyczny, który je ukształtował. Przedstawimy też historię działań zmierzających do ograniczenia rozmiarów tzw. dziury ozonowej. Jest to ciekawy przykład pokazujący, jak osiągnięto międzynarodowe porozumienie chroniące wspólny zasób, satysfakcjonujące zarówno dla stron skoncentrowanych na maksymalizacji zysku, jak i tych zwracających uwagę na stan środowiska. Przykład tym ważniejszy, że był to problem pod wieloma względami podobny do zagrażającej nam obecnie zmiany klimatu.

7.1 Jak do kryzysu klimatycznego i ekologicznego podchodzi ekonomia?

W pierwszej części tego porozdziału pokażemy, jak zmieniało się podejście ekonomistów oraz społeczeństw do środowiska naturalnego. Rewolucja przemysłowa dała ludziom siłę, jakiej nie mieli nigdy wcześniej. Ułatwiła kształtowanie świata według własnego pomysłu i przewyżczanie ograniczeń narzucanych przez środowisko. Znaczna część ekonomistów nadal uważa, że ludzkość nie porzuci drogi prowadzącej do coraz wyższego poziomu rozwoju i bogacenia się zarówno jednostek, jak i społeczeństw. Coraz więcej zjawisk wskazuje jednak na to, że okres ten dobiega końca, a wzrost gospodarczy zbliża się do fizycznych i biologicznych granic naszej planety.

DLACZEGO STANOWISKO EKONOMISTÓW JEST ISTOTNE?

List otwarty, podpisany w 2019 roku przez ponad 11 000 naukowców z całego świata, zawiera m.in. takie wezwanie: ... *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* (Ripple i in., 2019).



Warto zajrzeć do oryginału tego listu:

<https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>



W tym krótkim fragmencie widać wyraźnie, że środowisko naukowe odrzuca obecny model światowej gospodarki.

A jak podchodzą do tego ekonomiści? To ważne pytanie, bo wiele rządów różnych państw, podejmując decyzje związane z kryzysem klimatycznym, uwzględnia stanowisko w tych kwestiach ekonomii jako dziedziny nauki.

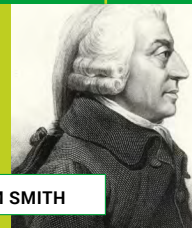
EKONOMIA NA ROZSTAJU

Źródła dominującego obecnie podejścia skoncentrowanego na wzroście PKB 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–Douglassa). Te równania pokazują, jaka jest – zdaniem ekonomistów – zależność między tzw. czynnikami produkcji a wielkością gospodarki. Patrząc na składowe tych funkcji, widzimy, co zdaniem ich autorów jest potrzebne, aby gospodarka mogła działać prawidłowo. W tym podrozdziale nie będziemy zagłębiać się w matematyczne równania. Zainteresowane osoby mogą sięgnąć do dowolnego podręcznika z makroekonomii, gdzie są one szczegółowo opisane. Z naszego punktu widzenia istotne jest to, co zdaniem ekonomistów głównego nurtu jest zaliczane do tzw. czynników produkcji: praca, kapitał i technologia. Wart odnotowania jest fakt, że nie uwzględnia się tu żadnego czynnika łączącego system ekonomiczny ze środowiskiem przyrodniczym.

Dlaczego tak jest? I czy tak było zawsze? Zaczynając od odpowiedzi na drugie pytanie, należy stwierdzić, że 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 (*land*) za jeden z podstawowych czynników produkcji. Zmieniło się to w XX wieku, gdy gospodarka przemysłowa zaczęła się szybciej rozwijać, a produkcja rolna odgrywać coraz mniej istotną rolę. Skupiono się wtedy na czynnikach, które mają podstawowe znaczenie dla produkcji przemysłowej, a więc na 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 stanowią istotnego czynnika ograniczającego potencjał produkcyjny i usunięto je z funkcji produkcji.

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

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 znanej pod nazwą handlową DDT. Była to pierwsza publikacja poruszająca problem negatywnego wpływu działalności człowieka na środowisko, która odniosła tak duży sukces handlowy.** Książka wyszła w ponad 6 milionach egzemplarzy, przetłumaczono ją na 30 języków, a jej wydanie uważa się obecnie za początek ruchów ekologicznych. Dziś wiemy, że tak ostra krytyka DDT była zapewne nieco przesadzona. Ostatnie badania dowodzą, że jest on mniej szkodliwy od obecnie stosowanych pestycydów, a co więcej, że – paradoksalnie – popularność tej książki mogła przyczynić się do wycofania taniego i relatywnie mało szkodliwego DDT i zastąpienia go silniejszymi środkami. Natomiast, niezależnie od kontrowersji wokół rzeczywistego wpływu DDT na środowisko, książka Rachel Carson na stałe zmieniła postawy opinii publicznej, uświadamiając ludziom zagrożenia dla przyrody wynikające z gospodarczej działalności człowieka.



ADAM SMITH



DAVID RICARDO



JOHN STUART MILL



RACHEL CARSON



1962



Dla zainteresowanych:
<https://www.rachelcarson.org/>

Dziś wiemy, że w latach 60. i 70. XX wieku koncerny były w pełni świadome wpływu, jaki ma na klimat spalanie paliw kopalnych. Oddziaływanie gazów cieplarnianych zostało jednoznacznie opisane w raporcie z 1968 roku przygotowanym dla Amerykańskiego Instytutu Naftowego. Podobne wnioski z badań prowadzonych przez ExxonMobile przedstawił zarządowi tej firmy James Black w 1977 roku.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl
 Co przez kilkadziesiąt lat ukrywał Exxon?



NAUKA O KLIMACIE
 DLA ŚCIEŻYNYCH

Raport
Klubu
Rzymskiego



1972



Pełny raport można pobrać
ze strony

www.clubofrome.org



JIMMY CARTER
prezydent Stanów
Zjednoczonych
1977-1981



Warto zajrzeć do nagrań obu
wystąpień prezydenta
Cartera dostępnych na przy-
kład na platformie YouTube.

1977
1979

Kolejną ważną publikacją, która pojawiła się w tym okresie, był raport Klubu Rzymskiego z 1972 roku *Limits of Growth* (Meadows i in. 1972; wyd. polskie: *Granice wzrostu* ukazało się w 1973 r.). Jego autorzy zwrócili uwagę na fakt, że istnieją naturalne, środowiskowe limity dla ekspansji produkcji przemysłowej, wytwarzania żywności i liczebności ludzkiej populacji. **Przedstawili analizę pokazującą, że stały wzrost gospodarczy nieuchronnie prowadzi do wyczerpania nieodnawialnych zasobów naturalnych Ziemi, a w konsekwencji do załamania gospodarki.** Publikacja ta była zupełnie niezgodna z obowiązującymi w tamtym czasie poglądami i początkowo została ostro skrytykowana przez ekonomistów, naukowców i polityków. Na przykład Robert 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. Henry Wallich, Allen V. Kneese i William Riker). Pomimo krytyki *Granice wzrostu* odniosły ogromny sukces. Sprzedano 12 milionów egzemplarzy anglojęzycznej wersji tego raportu i przetłumaczono go na 37 języków.

Potwierdzeniem słuszności zawartej w nim analizy były dwa kryzysy paliwowe w latach 70. XX wieku. Pierwszy, w 1973 roku, doprowadził do wzrostu cen ropy o około 400%, a kolejny, w 1979 roku, podniósł ceny o kolejne 100%, co oczywiście spowodowało załamanie gospodarcze. 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. Z punktu widzenia ekologii ważnym skutkiem kryzysu było jednak uświadomienie mieszkańcom 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.

Te wydarzenia pozwalają lepiej zrozumieć, dlaczego **prezydent Stanów Zjednoczonych Jimmy Carter** zdecydował się wygłosić dwa ważne wystąpienia: „Address to the Nation on Energy” 18 kwietnia 1977 roku („The New York Times”, 1977) oraz „A Crisis of Confidence” 15 lipca 1979 roku („American Experience”, 2019). W obu **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 na stale zwiększającym się zużyciu zasobów i że w życiu warto dążyć do innych niż tylko konsumpcja celów. Przedstawił Amerykanom jasny wybór między ograniczeniem zużycia 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 zapotrzebowania na stale rosnące dostawy 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 zwycięstwa egoizmu. Jej punktem wyjścia jest błędne wyobrażenie o wolności, o prawie do bezwzględnego wykorzystywania swojej przewagi nad innymi. Droga ta byłaby ciągłym konfliktem różnych grup interesów, kończącym się chaosem i stagnacją. Jest to pewna droga do porażki.

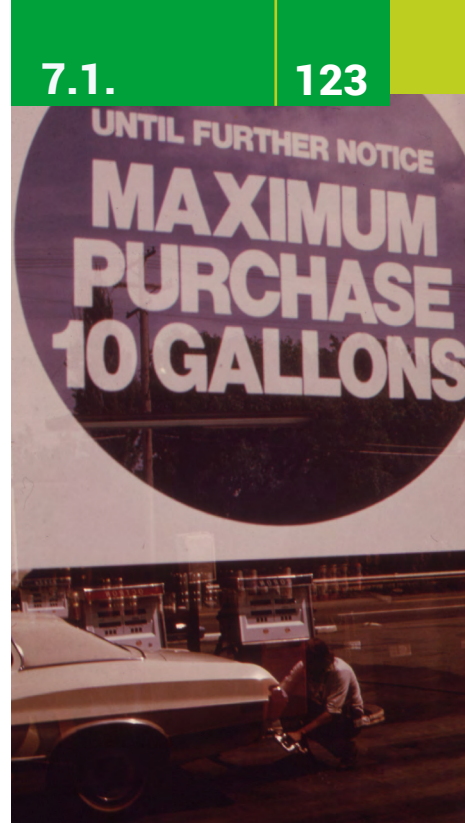
Cała nasza przeszłość, wszystkie lekcje płynące z naszej historii, wszystkie obietnice naszej przyszłości wskazują nam inną drogę – drogę wspólnego celu i przywrócenia wartości amerykańskich. To ona prowadzi do prawdziwej wolności naszego narodu i nas samych. Zrobimy pierwszy krok na tej drodze, gdy przystąpimy do rozwiązywania naszych problemów energetycznych.

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

Amerykanie dokonali wyboru – jak wiemy, kolejnym prezydentem został Ronald Reagan. Jego polityka w wielu aspektach była przeciwieństwem podejścia Cartera. Dla Reagana rozwój gospodarki miał absolutny priorytet, a jego poglądy dotyczące przyrody dobrze oddają cytaty z jego wypowiedzi: *jeśli widziałeś jedną sekwoję, to tak jakbyś widział je wszystkie (If you've seen one redwood tree, you've seen them all)* czy: *drzewa powodują więcej zanieczyszczeń niż samochody (trees cause more pollution than automobiles do)*.

I znów, wybór na prezydenta Ronalda Reagana był znamieny dla nastrojów społecznych, jakie panowały w tamtym okresie również w innych krajach rozwiniętych – w Europie Zachodniej, Kanadzie, Australii. W latach 80. zakończył się kryzys paliwowy, powrócił szybki wzrost gospodarczy, rósł optymizm konsumencki i stopniowo zapomniano o zagrożeniach związanych z ograniczoną dostępnością zasobów, negatywnym wpływem odpadów czy emisji gazów cieplarnianych, a także o publikacjach Klubu Rzymskiego ostrzegających, że wykładniczy wzrost gospodarczy nie może trwać wiecznie.

Większość ekonomistów również nie zwracała uwagi na te zagrożenia. Kluczowym zagadnieniem, które zaprzątało ich w tamtym czasie, było poszukiwanie metod przyspieszenia wzrostu gospodarczego i jego trwałego utrzymania. Ta opinia może nie spodobać się ekonomistom, ale z dzisiejszej perspektywy widać, że większość zagadnień, którymi zajmowała się ta nauka 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 – była (i nadal jest) analizowana przede wszystkim w kontekście ich wpływu na tempo rozwoju gospodarki. Za taki stan rzeczy odpowiadają nie tylko ekonomiści, ale i – a może nawet przede wszystkim – ludzie, którzy wyżej cenią bogacenie się niż dbanie o przyrodę i zgodnie z takimi preferencjami dokonują decyzji wyborczych.



Kryzys paliwowy, Stany Zjednoczone, lata 70. XX wieku.
Napis na planszy:
DO ODWOŁANIA
TANKOWANIE DO MAKSYMUM
10 GALONÓW

WZROST WYKŁADNICZY

Profesor Albert A. Bartlett (1923–2013), profesor fizyki z University of Colorado w Boulder, uważał, że:

Największym ograniczeniem rasy ludzkiej jest niezdolność zrozumienia funkcji wykładniczej.

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



Nagrane wykłady prof. Alberta A. Bartletta są dostępne w Internecie, na przykład na platformie YouTube

W środowisku ekonomicznym silny głos wzywający do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych zabrzmiał ponownie 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 przystąpienia do prób przeciwdziałania 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 przedziale 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 takich działań. Na przykład Tony Blair, ówczesny premier Wielkiej Brytanii, powiedział: „Jeśli nie sprostamy temu wyzwaniu, to z pewnością nie będziemy w stanie wytłumaczyć się przyszłym pokoleniom, które zawiedziemy”. Pojawiały się zarazem liczne głosy krytyczne, oskarżające autorów raportu o nadmierne alarmistyczny ton (Lomborg, 2006) lub sugerujące, że w istocie raport został przygotowany po to, aby uzasadnić podniesienie podatków od paliw (Leah, 2006). Środowisko ekonomiczne również było podzielone. Część ekonomistów oceniła go pozytywnie (np. Robert Solow, James Mirrelees, Joseph Stiglitz, Jeffrey Sachs), ale znaczna część – negatywnie. Najczęściej krytykowano zbyt niski poziom stopy dyskontowej przyjęty w raporcie, czyli parametr, który określa stopień, w jakim pomniejszamy obecną wartość przyszłych strat. William D. Nordhaus w recenzji raportu zespołu Sterna argumentował, że jednym z głównych wniosków płynących z badań oceniających ekonomiczną opłacalność zmniejszania zmiany klimatu jest zalecenie, aby w najbliższych latach ograniczać emisje gazów cieplarnianych tylko w niewielkim stopniu i w kolejnych dekadach te ograniczenia stopniowo zwiększać. Dlatego Nordhaus uważał, że rekomendowane przez raport zmniejszanie emisji gazów cieplarnianych już teraz jest sprzeczne z ustaleniami współczesnej ekonomii (Nordhaus, 2007).

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

NAGRODA NOBLA DLA WILLIAMA D. NORDHAUSA

William D. Nordhaus jest wybitnym ekonomistą, który już od lat 70. XX wieku zajmuje się problemem związków gospodarki z globalnym ociepleniem. Jest autorem wielu książek na ten temat, a od 1985 roku także współautorem bardzo popularnego podręcznika do ekonomii opublikowanego 17 lat wcześniej przez Paula Samulesona (*Ekonomia* – 19 edycji w 17 językach od 1948 roku).



Warto zajrzeć do oryginału recenzji Nordhausa:

A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change



Nordhaus powinien więc być świadomy negatywnego oddziaływania gospodarki na środowisko oraz rozumieć, jakie ograniczenia ma ocena sukcesu ekonomicznego wyłącznie na podstawie tempa wzrostu gospodarczego. Sam opisywał to już w 1972 roku w artykule „Is Growth Obsolete?” (Czy wzrost się nie zdezaktualizował?) 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 to górny limit dopuszczalnego zakresu zmian. Nordhaus podkreślał, że te wartości należy traktować bardzo umownie, bo sam miał duże zastrzeżenia do sposobu jego ustalenia. Z czasem limit 2°C zyskał jednak powszechne uznanie.

W kolejnych dekadach Nordhaus dalej zajmował się problemem wpływu globalnego ocieplenia na wzrost gospodarczy, a przygotowane przez jego zespół analizy należą do najważniejszych we współczesnej ekonomii. Dla nas szczególnie istotne są rozwijane od lat 90. XX wieku modele DICE (*Dynamic Integrated Climate-Economy*; Modele dynamicznej, zintegrowanej klimatycznie gospodarki) opisujące związki między gospodarką a skalą zmiany klimatu.

W uzasadnieniu Akademii przyznającej w 2018 roku Nagrodę im. Alfreda Nobla Williamowi D. Nordhausowi i Paulowi M. Romerowi podkreślono, że:

William D. Nordhaus jako pierwszy stworzył model ilościowy, który opisał wzajemną zależność między gospodarką a klimatem.

oraz, że:

[...] obaj laureaci wprowadzili wiedzę i przyrodę do sfery analizy ekonomicznej i sprawili, że stały się jej integralną częścią.

Można się spierać, czy rzeczywiście prace Nordhaus i Romera były pod tym względem pierwsze, ale zdaniem Akademii właśnie ten aspekt zasługiwał na nagrodę. Faktem jest, że Nordhaus niejako przetłumaczył argumenty naukowców z wielu dziedzin nauk przyrodniczych na język ekonomii. Poprzez stworzenie modelu, który pozwala oszacować wpływ zmiany klimatu na poziomie finansowym, ekonomiści zostali bliżej włączeni w prace nad tym zjawiskiem.

Model DICE spotkał się jednak z poważną krytyką znacznej części uczonych zajmujących się problemem zmiany klimatu. Zarzuca mu się zbyt daleko idące uproszczenia prowadzące do skrajnego niedoszacowania wpływu globalnego ocieplenia na stan gospodarki i biosfery. A przecież twórca tego modelu powinien być świadomy zagrożenia związanego ze zmianą klimatu i zdawać sobie sprawę z oddziaływania swoich prac na decyzje rządów wielu krajów.

Możemy tu zacytować samego Nordhaus, który swoim wykładzie noblowskim ogłoszonym 9 grudnia 2018 roku powiedział: „Wspólnym celem między-



WILLIAM D. NORDHAUS

Nagroda Banku Szwecji im. Alfreda Nobla w dziedzinie ekonomii w 2018 roku



Prezentacja Williama D. Nordhaus, **The Economics of Climate Change**, wygłoszona po otrzymaniu Nagrody im. Nobla jest dostępna na stronie www.nobelprize.org

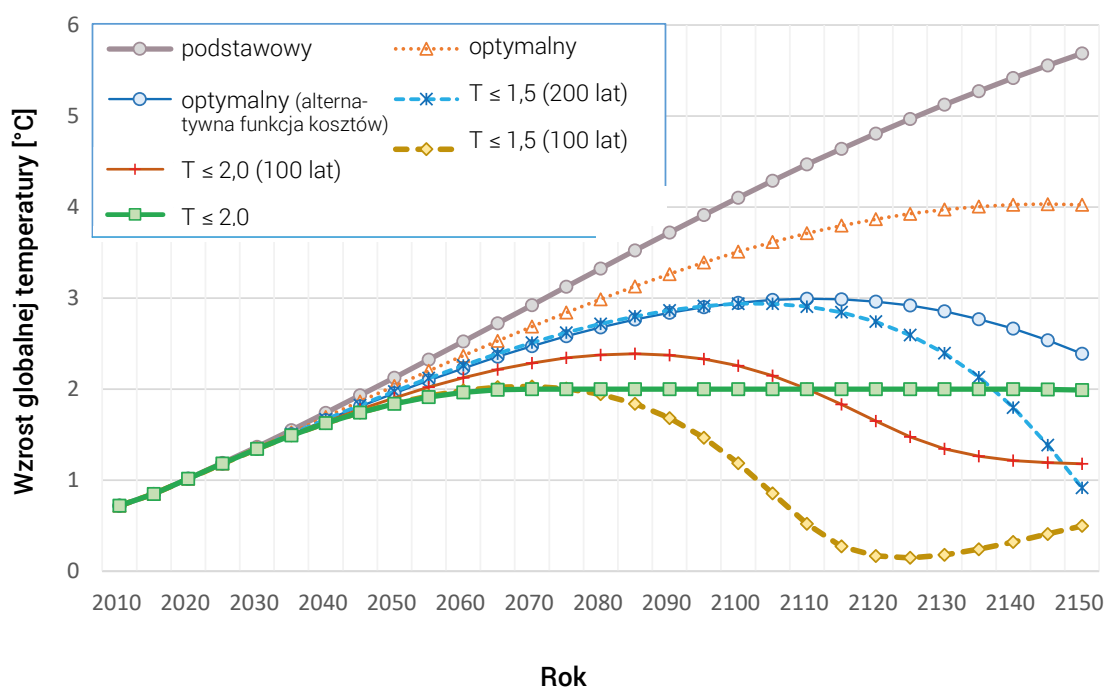


Uzasadnienie Akademii, przyznającej Nagrody Nobla z dziedziny ekonomii w 2018 roku jest dostępne na stronie www.nobelprize.org

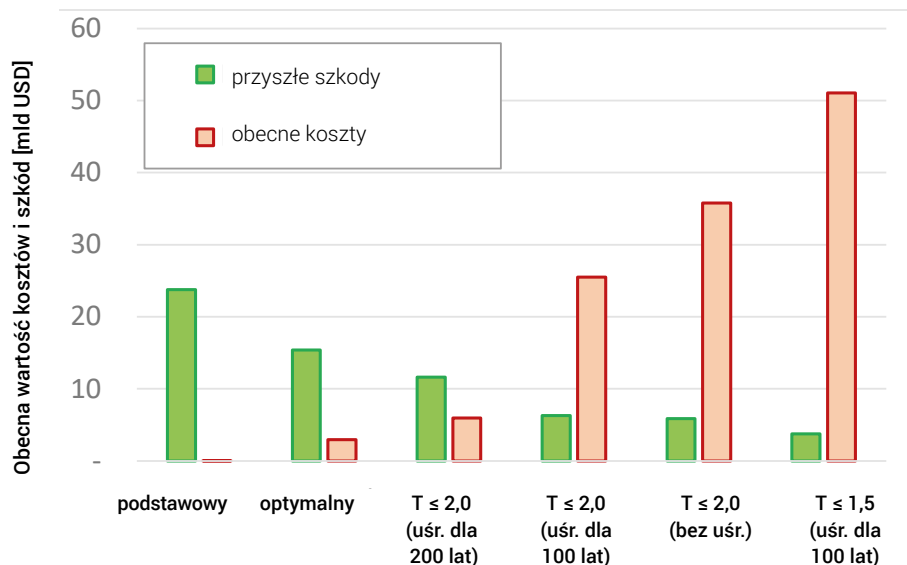
narodowych negocjacji i polityk jest ograniczenie wzrostu temperatury do 2°C w stosunku do poziomu sprzed epoki przemysłowej. Szacuje się, że może to kosztować około 4% naszych dochodów w ciągu następnego stulecia lub dwóch. To może być dobre dla natury, ale tak drastyczne obniżenie dochodów zdecydowanie nie jest atrakcyjne dla wyborców..." (*A common goal of the international negotiations and policies is to limit temperature to 2°C above pre-industrial levels and estimates are 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...*).

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

Podczas swojego wykładu 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 ilustracji 7.1.1., w scenariuszu uznanym za „optymalny” temperatura rośnie o 4°C, czyli o wartość, która – zgodnie z oceną środowisk naukowych reprezentowanych przez 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, które szerzej opisujemy w kolejnych rozdziałach tej książki). W raportach IPCC taki wzrost temperatury pojawia się w najbardziej pesymistycznym scenariuszu – RCP8.5, zakładającym brak działań ograniczających zmianę klimatu (określanym w nim jako *business as usual*).



Ilustracja 7.1.1. Zmiana temperatury w zależności od działań ograniczających zmianę klimatu: slajd nr 6 z wykładu noblowskiego Williama D. Nordhaus, zatytułowanego „Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics” (Zmiana klimatyczna: ostateczne wyzwanie dla ekonomii).
Źródło: www.nobelprize.org



Ilustracja 7.1.2. Koszty zapobiegania oraz szkody przy różnych działaniach ograniczających zmianę klimatu: slajd nr 7 z wykładu noblowskiego Williama D. Nordhaus; uśr. – uśrednienie; $T \leq 2,0$ – limit wzrostu temperatury $2,0^{\circ}\text{C}$.

Źródło: www.nobelprize.org

Dlaczego tak wysoki wzrost temperatury jest uznany przez laureata Nagrody Nobla za optymalny? Wynika to z jego analizy kosztów i korzyści przedstawionej na wykresie (ilustracja 7.1.2.) prezentującym różne scenariusze: „podstawowy” (nie zapobiegamy zmianie 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 $1,5^{\circ}\text{C}$. Zielone słupki oznaczają koszty, które poniesiemy w przyszłości z powodu negatywnych efektów zmiany klimatu, a czerwone oznaczają koszty, które trzeba ponieść teraz, aby dany scenariusz zrealizować.

Na podstawie tych danych, zdaniem Nordhaus, 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.

Z takim podejściem całkowicie nie zgadza się większość naukowców zajmujących się badaniami nad klimatem. Profesor Steve Keen argumentuje, że nie można budować modelu oceniającego przyszły wpływ dużych zmian temperatury na gospodarkę na podstawie związków między wysokością temperatury a PKB. 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 obejmujących podstawowe systemy regulujące klimat Ziemi, takich jak zniknięcie pokrywy lodowej na biegunie północnym czy spowolnienie lub wręcz zatrzymanie Prądu Zatokowego.



Warto zajrzeć do wykładu prof. Steve'a Keena **Averting Systemic Collapse** (Zapobieganie systemowej zapaści) wygłoszonego na konferencji OECD we wrześniu 2019 roku, dostępnego na platformie YouTube.



Więcej o świecie
cieplejszym o 4°C
znajdziesz na stronie 132.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Niedoceniane koszty gospo-
darcze zmiany klimatu**



Ponadto, zgodnie z modelem DICE, jedyny efekt zmiany klimatu to wzrost średniej temperatury, a wszystkie inne parametry klimatyczne pozostają niezmiennic. Jest to ogromne uproszczenie, zakładające, że poszczególne strefy klimatyczne zmieniają jedynie swój obszar występowania, ale jakościowo pozostaną takie same. Model DICE oparto na danych uwzględniających zależności między poziomem dochodów a temperaturą występującą obecnie w różnych rejonach świata. Wykazały one słabą zależność między tymi zmiennymi. Przyjęto, że również słaby będzie wpływ przyszłej zmiany klimatu na gospodarkę.

Zaproponowany 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, można spostrzec po zestawieniu ich 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 niewielki.

Bardzo ważny zarzut wobec prac Nordhousa jest związany z ich znaczącym wpływem na światową politykę klimatyczną. Zdaniem naukowców zajmujących się klimatem, takie koncepcje jak model DICE w praktyce legitymizują brak reakcji rządów na katastrofalną zmianę klimatu. Nadają wzrostowi gospodarczemu najwyższy priorytet, deprecjonując bezpośrednie zagrożenia dla znanych dzisiaj form życia, jakie nieuchronnie pociągnie za sobą katastrofa klimatyczna.

Uprozczone analizy, nieuwzględniające podstawowej wiedzy o fizycznych mechanizmach decydujących o klimacie 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 problemu.

Suma wyemitowanego CO₂ od lat 70. XX wieku do chwili obecnej jest większa niż suma wszystkich emisji do roku 1970. Oznacza to, że w czasie, gdy zdawano już sobie sprawę z negatywnego wpływu rosnącego stężenia gazów cieplarnianych na klimat i biosferę, gospodarka światowa uwolniła do atmosfery więcej CO₂ niż w całym wcześniejszym okresie.

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



Dane za: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_data.html

EKONOMIA EKOLOGICZNA

Nurtem w ekonomii, o którym koniecznie należy szerzej opowiedzieć, jest ekonomia ekologiczna. Za jej najważniejszego założyciela uważa się prof. Hermana Daly'ego, który od lat 70. XX wieku rozwija koncepcję gospodarki znajdującej się w stanie stacjonarnym (*steady-state economy*). Przyjmuje on założenie, 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.

Wyciągane na tej podstawie konkluzje są rewolucyjne wobec dominującego obecnie nurtu ekonomii skupionej na wspomaganiu tempa rozwoju gospodarczego. Oznacza to bowiem, że nieskończony wzrost nie jest możliwy z powodu ograniczonej pojemności naszej planety. Koncepcja stacjonarnego stanu gospodarki nie jest jednak nowa i nie aż tak kontrowersyjna, jak się dzisiaj 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 historia ludzkości analizowana z nieco dłuższej perspektywy czasowej wyraźnie wskazuje, że wzrost gospodarczy nie jest normą, lecz raczej sytuacją wyjątkową, nastał on 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, by ludzkość nauczyła 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 rozwój może prowadzić do coraz wydajniejszego jakościowo i lepszego wykorzystania skończonej puli zasobów. Jest to możliwe, ale wymaga użycia innych miar sukcesu niż tempo wzrostu. Jako alternatywną miarę Herman Daly wspólnie z Johnem Cobbem proponują Indeks Trwałego Dobrobytu Ekonomicznego

HERMAN DALY

ekonomista Banku Światowego, twórca nurtu ekonomii ekologicznej, laureat wielu prestiżowych nagród.

Uważa, że wzrost gospodarczy nie może trwać wiecznie. Sformułował i szczegółowo opisał założenia stacjonarnego stanu gospodarki.

(*Index of Sustainable Economic Welfare*), uwzględniający obok poziomu konsumpcji takie elementy, 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 Daly'ego, utrzymywanie wzrostu wymaga korzystania z zasobów środowiska naturalnego (takich jak surowce mineralne, ekosystemy czy paliwa kopalne), które są więcej warte niż wygenerowany ich kosztem kapitał. Gospodarka znajdująca się w takim stanie, czyli zbyt duża, wytwarza więcej niepożądanych skutków (w postaci zanieczyszczeń, odpadów, zniszczonych ekosystemów i wyczerpywania się nieodnawialnych surowców) niż wartościowych dóbr. Ostateczny bilans jest więc ujemny: stajemy się biedniejsi, a nie bogatsi. Utrzymywanie ilościowego wzrostu gospodarki, zbyt dużej w stosunku do zajmowanej przez nią biosfery, jest w krótkim okresie niemądre, bo prowadzi do obniżenia jakości życia, a w długim – po prostu niemożliwe.

Kolejną osobą, która istotnie przyczyniła się do rozwoju ekonomii ekologicznej, jest William Rees, profesor University of British Columbia w Kanadzie. Jest twórcą pojęcia **śladu ekologicznego** (*ecological footprint*), będącego miernikiem wielkości biologicznie produktywnego obszaru niezbędnego do zaspokojenia konsumpcyjnych potrzeb ludzi. Za pomocą tego wskaźnika można ocenić, w jakim stopniu ludzie obciążają ekosystemy Ziemi lub – patrząc na to z innej strony – jak bardzo zależni są od natury. Wielkość ta jest różna dla poszczególnych krajów świata – w części z nich pojemność środowiska jest większa niż ślad ekologiczny wszystkich mieszkańców, w innych 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. Oznacza to, że zasoby odnawialne są wykorzystywane zbyt intensywnie, na przykład skala połowu ryb przewyższa ich roczny przyrost, więcej lasów jest wycinanych lub wypalanych, niż ich co roku przybywa, itd. William Rees szacuje, że ludzkość już w tej chwili przekracza o około 30% pojemność środowiskową Ziemi, zatem wyczerpuje zapasy jej naturalnego kapitału.



WILLIAM E. REES

profesor University of British Columbia w Kanadzie. Zajmuje się ekonomią ekologiczną, dynamiką zmian globalnych oraz ekologicznymi podstawami cywilizacji.



Warto zajrzeć do wystąpienia prof. Williama Reesa na platformie YouTube:

Ecological Economics, Degrowth and Denial

Jak widać, ekonomia ekologiczna zajmuje się nie tylko negatywnymi skutkami zmiany klimatu, ale ocenia oddziaływanie gospodarki na środowisko w sposób kompleksowy, traktując to zjawisko jako ważną, ale tylko jedną z wielu niepożądanych konsekwencji nadmiernego wzrostu gospodarczego. Jej przedstawiciele uważają, że celem rozwoju gospodarczego powinien być nie ilościowy wzrost gospodarki, ale rozwój dający ludziom większe poczucie satysfakcji z życia. Zakładają, że aby to osiągnąć, nie wystarczy coraz wyższy poziom konsumpcji dóbr materialnych, ale że trzeba też wziąć pod uwagę inne aspekty życia, na które stale rozrastająca się gospodarka przemysłowa może wpływać negatywnie.

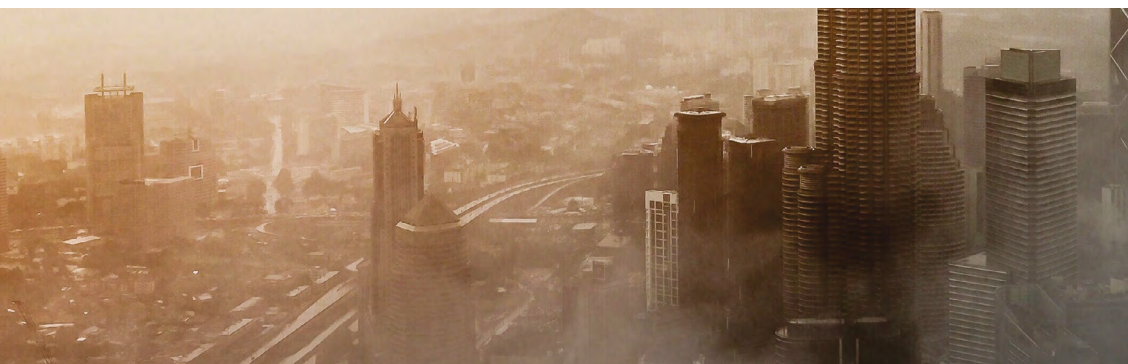
O ZNACZENIU WARTOŚCI, NORM SPOŁECZNYCH ORAZ PRAWA

Cele życiowe i wartości, które wyznajemy, są nadrzędną siłą kierującą naszymi działaniami. To, do czego dążymy, jest zależne od tego, co uznajemy w życiu za sukces. Obecnie dominującym wzorem, do którego aspiruje większość ludzi, jest jak najwyższy poziom konsumpcji. Bogactwo definiowane przez

posiadanie drogich przedmiotów, dużych domów i spędzanie wakacji w odległych miejscach świata jest modelem życiowego sukcesu popularyzowanym przez media.

Odpowiednikiem tego zjawiska są postawy wobec zmiany klimatu ekonomistów głównego nurtu, dążących do wysokiego wzrostu gospodarczego zamiast do ochrony trwałości i bezpieczeństwa 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 przez działalność gospodarczą człowieka.

Wartości, które wyznajemy, funkcjonują 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 wpływa na postawy ludzi. Badania naukowe dowodzą, że rozporządzenia prawne w miarę upływu czasu prowadzą do przyjęcia nowych, powszechnie wyznawanych wartości i preferencji. Przykładem takiego oddziaływania regulacji prawnej może być nakaz sortowania śmieci, który początkowo był traktowany jako przymus z zewnątrz, ale w miarę upływu czasu został uznany przez wiele osób za słuszną zasadę, niezależną od obowiązującego prawa. Dlatego ważne jest wdrażanie przepisów, które wspierają odpowiedzialne postawy ekologicznie, bo wzmacnia to wartości zgodne z takim zachowaniem. Rozwiązania systemowe są potrzebne również dlatego, że klimat i środowisko to dobra publiczne (o czym była mowa w rozdziale 4.) i troska o nie wymaga skoordynowanych, wspólnych działań.



Godny uznania jest ton, w jakim wypowiada się na tematy związane ze zmianą klimatu obecny **papież Franciszek**, który jest moralnym autorytetem dla katolików, a często jego opinia jest również 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* przypomina słowa swoich poprzedników wskazujących na potrzebę dbania o stan środowiska naturalnego. Sam bardzo dokładnie omawia sposób, w jaki 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.

PAPIEŻ
FRANCISZEK



2015

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 zmiany klimatu. 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].

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C

Prezentowana mapa (ilustracja 7.1.3.) została przygotowana przez firmę FutureMap i udostępniona nam przez jej właściciela Paraga Khanna. Pracuje on jako doradca strategiczny dużych organizacji (np. World Economic Forum czy Sił Specjalnych Stanów Zjednoczonych). W 2008 roku magazyn *Esquire* wymienił go jako jednego z 75 najbardziej wpływowych ludzi XXI wieku, a magazyn *Wired* umieścił na swojej „Smart List”, czyli liście 15 osób, których powinien słuchać przyszły prezydent Stanów Zjednoczonych.

Mapa uświadamia, jak 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 nadawał 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.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Spójrz na mapę i zastanów się, które z prognozowanych zmian są Twoim zdaniem prawdopodobne, a które nie. Spróbuj uzasadnić swoją opinię. Czy uważasz, że coś należałoby na tej mapie zmienić? Po przygotowaniu własnych propozycji przeczytaj nasz komentarz do tej prognozy.

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C – ĆWICZENIE

Przeście arktyczne

Ta cenna, wolna od lodu droga jest otwarta cały rok, udostępniając połączenie transportowe między zamieszkałymi obszarami Kanady i Rosji.

Grenlandia

Gwałtownie topi się pokrywa lodowa Grenlandii.

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 zwierzęta wytrzymałe na brak paszy i trudne warunki środowiska.

Syberia

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

Południowe Chiny

Wyschnięcie rzek i warstw wodonośnych sprawiło, że ten region został porzucony. Intensywne monsuny dodatkowo przyczyniły się do erozji gleby, zostawiając suchy pył.

Kanada

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

Skandynawia/Wielka Brytania/ Północna Rosja/Grenlandia

Zwarte miasta, z wysoką zabudową zapewniającą ochronienie większości populacji.

Południowo-zachodnie rejony USA

Pustynienie zmusiło ostatnich mieszkańców tego regionu do migracji na północ. Rzeka Kolorado pozostaje tylko wspomnieniem. Teren jest wykorzystywany do produkcji energii z paneli słonecznych

Peru

Topnienie lodowców spowodowało, że ten obszar jest suchy i nie nadaje się do zamieszkania.

Amazonia

Pustynia.

Patagonia

Topniejące lodowce odsłaniają nowe tereny dla rolnictwa, jednak słabe gleby są bardzo trudne do uprawy.

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.

Zachodnia Antarktyda

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

- 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 wiatrowa

Ilustracja 7.1.3. Mapa przedstawiająca hipotetyczny świat, gdy średnia temperatura na Ziemi wzrośnie o 4°C.

Źródło: Connectography, 2016 by Parag Khanna.

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

Warto zajrzeć do artykułu:
www.naukaoklimacie.pl

**Klimat dawnych epok:
wielkie wymierania**



WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C – KOMENTARZ

Ta mapa obrazuje potężne przeobrażenia, które mogą wystąpić w wyniku zmiany klimatu. Przedstawiona na niej sytuacja wygląda dramatycznie, ale należy zaznaczyć, że nie uwzględniono na niej problemów ekologicznych, o których pisaliśmy wcześniej i które z wysokim prawdopodobieństwem mogą wystąpić przy znacznym ociepleniu planety.

A oto nasze krótkie komentarze dotyczące konkretnych zmian przedstawionych na mapie:

WZROST POZIOMU OCEANÓW

Poziom oceanów na pewno wzrośnie, naukowcy dzisiaj nie potrafią jedynie sprecyzować, o ile metrów. Pokazana na mapie zmiana o 2 metry zawiera się w dolnym przedziale prognozowanego zakresu. W mniej optymistycznym scenariuszu wzrost poziomowi wody może być nawet o kilka metrów wyższy.

PUSTYNNIENIE OBSZARÓW MIĘDZYZWROTNIKOWYCH

Są to, niestety, prawdopodobne zmiany. Wzrost temperatury może spowodować pustoszczenie znacznych obszarów obecnie pokrytych roślinnością. Należy zaznaczyć, że te niekorzystne zmiany przyspiesza wypalanie i wycinanie lasów tropikalnych (Amazonia, Borneo, Afryka Środkowa). Problem pustoszczenia nie ogranicza się, niestety, do obszaru międzyzwrotnikowego. Także w Polsce zmiany w występowaniu opadów i nasilenie parowania prowadzą do pogłębiania się suszy i ryzyka stepowania, a nawet pustoszczenia znacznych obszarów naszego kraju.

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

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

Nie ma naukowych podstaw, by sądzić, że możliwe będzie wykorzystanie przez rolnictwo znaczących fragmentów Grenlandii czy Antarktydy. W przypadku Kanady i północnej Rosji może to być bardzo trudne ze względu na ubogie gleby. Nie ma też gwarancji, że opady na tych obszarach będą na tyle regularne, aby uprawiać tam rośliny.

MOŻLIWOŚĆ CAŁOROCZNEJ ŻEGLUGI NA OCEANIE ARKTYCZNYM

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

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C – KOMENTARZ

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, ponieważ znaczna część obszaru międzyzwrotnikowego może być zbyt gorąca dla organizmu człowieka. Trudno jednak 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 poważne konsekwencje dla ludzi żyjących na terenach zasilanych w wodę rzekami powstającymi z górskich lodowców.

POTENCJAŁ 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 kilkaset lat.

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

Jest to bardzo dyskusyjna zmiana. Pomysł, aby produkować energię tam, gdzie jest dużo słońca (pustynie w okolicy równika), i transportować ją na tereny zamieszkane przez ludzi, może się wydawać rozsądny. Jego realizacja jednak nie jest prosta i zależy od takich czynników, jak: warunki fizyczne, możliwości finansowe światowej gospodarki, dostępność surowców potrzebnych do wytworzenia takich instalacji, a także zawarcie trwałych, stabilnych porozumień politycznych.

Z tego powodu produkcja energii odnawialnej w kształcie zaprezentowanym na mapie jest bardzo mało prawdopodobna.

Źródło: książki Marcina Popkiewicza.



Więcej o wyzwaniach stojących przed energetyką można przeczytać w książkach Marcina Popkiewicza:

Świat na rozdrożu (2013)

Rewolucja energetyczna: Ale po co? (2016)

WIZJA ŚWIATA CIEPLEJSZEGO O 4°C – KOMENTARZ

ZAKOŃCZENIE

Chociaż mapa ta obrazuje dramatyczne konsekwencje zmiany klimatu, pomija wiele zjawisk, które z wysokim prawdopodobieństwem wystąpią przy tak znacznym ociepleniu planety: zatrzymanie cyrkulacji oceanicznej, zakwaszenie oceanów, zagłada raf koralowych, przyspieszenie procesu wymierania gatunków i inne zdarzenia w skali globalnej.

Prognozowanie, jak świat będzie wyglądał, kiedy dojdzie do ocieplenia o 4°C, jest trudne, gdyż mówimy tu o systemie obejmującym całą planetę (takim systemem jest klimat), o jego interakcji z żywymi ekosystemami, które mogą całkowicie załamać się pod wpływem zmiany klimatu, zachodzącej w bezprecedensowym tempie. Co najmniej równie niepewne są uwarunkowania zależne od działań ludzi, państw i społeczeństw w takiej sytuacji. Trudno też sobie wyobrazić, jakiej skali migracji 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 ludzkości dane było doświadczyć do tej pory.

Jeśli uważnie śledzisz wszystkie części tego podręcznika, to jest dla Ciebie oczywiste, 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. Aby do tego nie doszło, konieczne jest już dziś aktywne usuwanie dwutlenku węgla z atmosfery, pochodzącego zarówno z bieżących, jak i wcześniejszych emisji. Co więcej, nie ma żadnego powodu, aby przypuszczać, że ocieplenie nagle zatrzyma się na poziomie 4°C.

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

7.2. Protokół montrealwski jako przykład skutecznego międzynarodowego porozumienia ekologicznego

Protokół montrealwski 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.

W tym podrozdziale przedstawiamy mechanizmy, które spowodowały, że Protokół montrealwski (PM) stał się sukcesem, oraz wnioski z jego realizacji, które płyną dla międzynarodowego porozumienia klimatycznego. Opracowanie składa się z czterech części:

- w pierwszej opisujemy, czym jest warstwa ozonowa,
- w drugiej analizujemy problem niszczenia warstwy ozonowej, znany powszechnie jako tzw. dziura ozonowa,
- w trzeciej przedstawiamy 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.

JAK POWSTAJE I JAKĄ FUNKCJĘ PEŁNI WARSTWA OZONOWA?

Ozon tworzy się przede wszystkim w górnych warstwach atmosfery, gdzie pod wpływem promieniowania ultrafioletowego (UV) część cząsteczek tlenu (O_2) jest rozszczepiana na atomy (O) i reaguje z cząsteczkami O_2 , tworząc cząsteczki tlenu trójatomowego (O_3). Część cząsteczek ozonu jest z kolei rozszczepiana przez światło do atomów tlenu (O) i cząsteczek tlenu dwuatomowego (O_2). Dzięki tym procesom 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. Zmniejszenie grubości warstwy ozonowej zachodzi zwłaszcza 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.

CZY WIESZ, ŻE ?

Atmosfera ziemiska zawiera bardzo małe ilości ozonu, który znajduje się głównie w górnej atmosferze. Jest to tzw. 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 usunąć 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} metrów w warunkach standardowych.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Mario Molina o ozonie,
klimacie i docieraniu do ludzi**



Dobson to jednostka przyjęta
do określenia zawartości
ozonu w atmosferze.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Dziura ozonowa – historia
sukcesu**

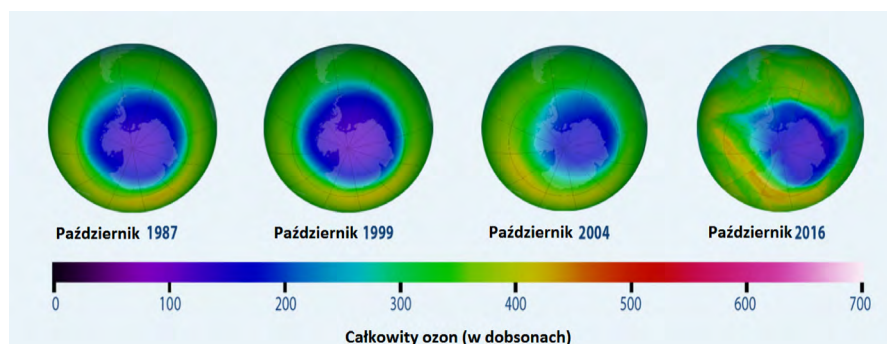


W latach 70. XX wieku odkryto, że w rozkładzie ozonu mogą brać udział związki chemiczne produkowane przez człowieka – freony (Molina i Rowland, 1974). Jak może pamiętać z rozdziału 5., freony to chlorofluoropochodne węglowodorów (*chloro-flouro carbons*, CFC), czyli związki powstające, gdy w węglowodorach alifatycznych (np. metanie, propanie, butanie) atomy wodoru zostaną zamienione na atomy chloru lub fluoru.

Freony to wynalazek amerykańskiego koncernu DuPont, przez który zostały opatentowane w latach 30. XX wieku. 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 pojemnikach aerozolowych (np. kosmetyki, farby). Trwałość freonów powoduje jednak, że gdy dostaną się do atmosfery, pozostają w niej bardzo długo. Rozpaść mogą się jedynie w jej górnej warstwie, gdzie promieniowanie UV powoduje uwolnienie atomów chloru. Niestety, w stratosferze uwolnione atomy chloru wchodzi w reakcję z cząsteczkami ozonu, w wyniku której powstają zwykłe cząsteczki tlenu (O_2) oraz jony ClO^- . 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 ten gaz powstaje.

Obszar, w którym grubość warstwy ozonowej spadnie poniżej 220 dobsonów, nazywamy 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 w stratosferze o 5% 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.

W październiku 1999 roku dziura ozonowa osiągnęła maksymalną, z dotychczas zaobserwowanych, powierzchnię równą 26,6 mln km², co przedstawiono na ilustracji 7.2.1. (na niebiesko zaznaczono obszar z koncentracją ozonu poniżej 220 dobsonów).



Ilustracja 7.2.1. Dziura ozonowa nad Antarktydą w latach 1987–2016.

Źródło: TOMS science team & and the Scientific Visualization Studio, NASA GSFC.



NASA

Przyjmując kryteria obowiązujące w ekonomii, warstwę ozonową należy traktować jako dobro publiczne. Lokalizacja emisji freonu nie ma bowiem znaczenia dla występującej nad danym krajem grubości warstwy ozonowej. Wyemitowana w jakimś miejscu do atmosfery cząsteczka freonu, w wyniku ruchów prądów atmosferycznych, może trafić zupełnie gdzie indziej. Żaden kraj nie ma zatem motywacji, aby jednostronnie wprowadzać ograniczenia 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. Czyli problem ten wymaga zupełnie innych rozwiązań niż na przykład zanieczyszczenia powodujące smog (tj. tlenków azotu i siarki oraz pyłów zawieszonych), kiedy lokalne działania bezpośrednio przekładają się na lokalną poprawę jakości powietrza.

PROTOKÓŁ MONTREALSKI

W odpowiedzi na rosnącą liczbę danych dowodzących niszczącego wpływu freonów na warstwę ozonową państwa zrzeszone w ONZ uchwaliły w 1985 roku Konwencję wiedeńską o ochronie warstwy ozonowej, a w 1987 roku tzw. Protokół montrealwski. 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 ilustracji 7.2.2. przedstawiono zarejestrowany i oczekiwany wpływ substancji uwzględnionych w Protokole montrealskim na warstwę ozonową. Czarną ciągłą linią oznaczono obserwacje i projekcje na przyszłość w przypadku, gdyby Protokół montrealwski nie został podpisany. Liniami kolorowymi oznaczono prognozy przy założeniu, że Protokół będzie realizowany w pierwotnym brzmieniu lub po kolejnych poprawkach. Na ilustracji 7.2.3. przedstawiono oszacowania liczby dodatkowych zachorowań na raka skóry dla kolejnych wersji porozumienia.

Widok z kosmosu na Ziemię z cienką warstwą atmosfery.



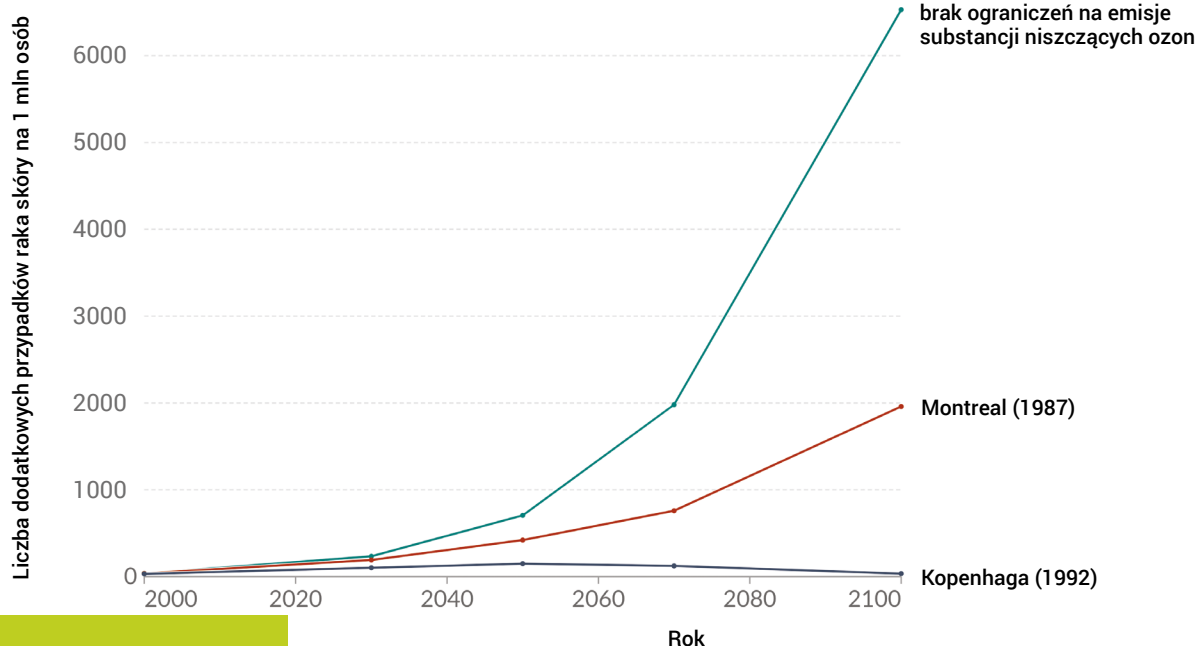
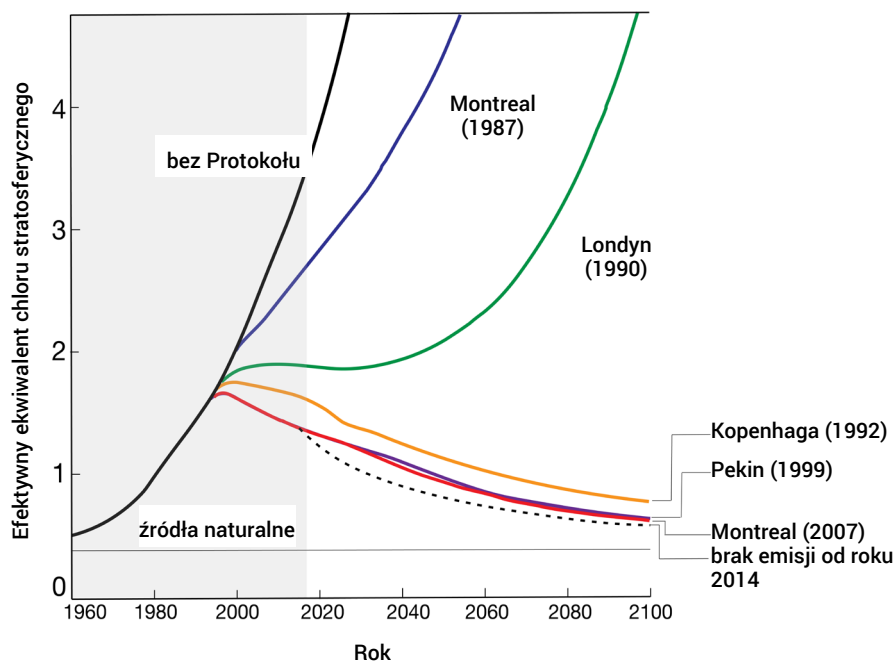
Dobra publiczne omawiamy szerzej w rozdziale 4.

Ilustracja 7.2.2. Zarejestrowany i oczekiwany wpływ na warstwę ozonową substancji uwzględnionych w Protokole montrealskim oraz dla kolejnych jego uaktualnień.

Źródło: ourworldindata.org

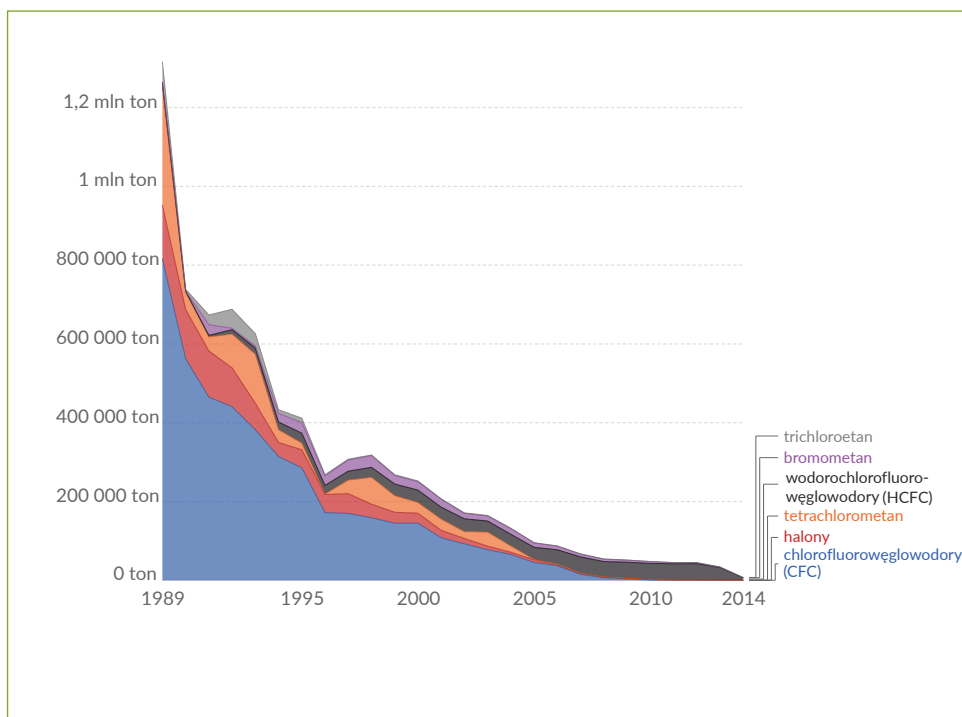
Ilustracja 7.2.3. Szacowana liczba dodatkowych przypadków raka skóry (mierzona na 1 mln osób), w wyniku zaniku stratosferycznego ozonu i wyższej ekspozycji na promienie UV.

Źródło: ourworldindata.org



Przy okazji warto zauważyć, że Protokół montrealwski znacząco zmniejszył także zagrożenie związane ze zmianą klimatu, ponieważ freony są silnymi gazami cieplarnianymi – gdyby ich dodawanie do atmosfery nie zostało zahamowane, mielibyśmy dziś do czynienia z dużo silniejszym efektem cieplarnianym.

Ilustracja 7.2.4. obrazuje, jak z biegiem lat zmieniało się zużycie substancji objętych Protokółem montrealskim. Ponieważ czas życia freonów w atmosferze jest bardzo długi, spodziewamy się powolnego, trwającego kilkadziesiąt lat spadku ich wpływu na warstwę ozonową. 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, wiążące ten fakt z malejącymi koncentracjami substancji niszczących ozon (Solomon i in., 2016).



Ilustracja 7.2.4. Światowe zużycie substancji niszczących warstwę ozonową w latach 1989–2014.

Źródło: dane UNEP za Our World in Data.

WNIOSKI PŁYNĄCE Z PROTOKOŁU MONTREALSKIEGO DLA GLOBALNEGO POROZUMIENIA KLIMATYCZNEGO

Porozumienie z Montrealu stanowi ważny punkt odniesienia dla społeczności międzynarodowej dążącej do rozwiązania innych problemów ekologicznych, w tym problemu globalnego ocieplenia. W tym podrozdziale zastanowimy się, czy i w jakim stopniu można w tym celu wykorzystać doświadczenia związane z Protokołem montrealским.

Problemy dziury ozonowej i globalnego ocieplenia, pod względem mechanizmów funkcjonujących w biznesie, polityce i wśród opinii publicznej, są w wielu wymiarach podobne. Aby zrozumieć, dlaczego PM okazał się sukcesem, a globalne porozumienie rodzi się w bólach, przeanalizujemy kalendarium wydarzeń i strategię głównych graczy.

W pierwszej połowie lat 70. opublikowano pierwsze prace (Johnston, 1971; Molina i Rowland, 1974) wskazujące na związek między stężeniem stratosferycznego ozonu a emisją freonów. Po ukazaniu się tych publikacji, a zwłaszcza artykułu Moliny i Rowlanda (1974), pojawiły się prace naukowe w dużej części sponsorowane przez firmy chemiczne, które kwestionowały negatywny wpływ freonów na warstwę ozonową. Duży wysiłek włożył w to zwłaszcza gigant chemiczny DuPont, który był właścicielem patentu na produkcję freonu. Przygotowano akcje propagandowe skierowane do zwykłych ludzi, zniechęcające do krytyki stosowania freonów. Argumentowano, że są one 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 warstwę ozonową, aczkolwiek nadal pojawiały się w nim głosy kwestionujące taki związek. W pierwszej połowie lat 80. naukowcy oraz organizacje ekologiczne postulowali ograniczenie lub zakaz

produkcji freonów. Największym przeciwnikiem takiego rozwiązania pozostał DuPont – ten gigant chemiczny miał wtedy bardzo duży wpływ na stanowisko rządu amerykańskiego, bez którego podpisanie jakiegokolwiek skutecznego porozumienia międzynarodowego nie było możliwe.

Istotna zmiana nastąpiła w 1985 roku, kiedy zespół naukowy pod kierunkiem Joe Farmana opublikował w *Nature* artykuł, który wstrząsnął międzynarodowym środowiskiem naukowym. Przedstawione w nim wyniki badań wskazywały na bardzo rozległą dziurę ozonową nad Antarktydą. Stopień ubytku ozonu oraz rozległość dziury były dużym zaskoczeniem nawet dla specjalistów zajmujących się tym problemem. Oprogramowanie wykorzystywane przez NASA początkowo sklasyfikowało 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 podpisały Konwencję wiedeńską o ochronie warstwy ozonowej. Była to właściwie bardziej deklaracja o woli ochrony warstwy ozonowej niż akt prawny, który pozwalałby na rzeczywiste działania.

W 1986 roku nastąpił kolejny nieoczekiwany zwrot. Firma DuPont, która wcześniej zdecydowanie sprzeciwiała się jakimkolwiek regulacjom ograniczającym produkcję freonu, we wrześniu tego roku poparła międzynarodowe dążenia zmierzające do ograniczenia produkcji CFC (Maxwell i Briscoe, 1997). Pozytywne stanowisko DuPont skłoniło ostatecznie rząd amerykański do poparcia Protokołu montrealskiego, który podpisano w 1987 roku.

Istnieje wiele opracowań analizujących strategię koncernu DuPont, który okazał się bardzo istotnym graczem – bez zmiany jego stanowiska w tej kwestii nie doszłoby do podpisania tego porozumienia. Analizy wskazują, że w całej tej rozgrywce firma była zainteresowana przede wszystkim maksymalizacją zysku: w 1979 roku wygaś patent na produkcję CFC, którego właścicielem był koncern. DuPont w kolejnych latach odnotował niższe zyski z tytułu sprzedaży freonów. Biorąc to pod uwagę i zdając sobie sprawę z rosnącej liczby dowodów wskazujących na związek między emisją CFC a dziurą ozonową, koncern ten podjął intensywne prace badawcze mające na celu opracowanie nieszkodliwych dla ozonu substytutów freonów. Związkami takimi okazały się HCFC – wodorochlorofluorowęglowodory (*hydro-chloro-flouro-carbons*), których wytwarzanie zostało przez koncern DuPont opatentowane w 1986 roku, co zbiegło się ze zmianą jego stanowiska.

W wyniku ograniczenia produkcji CFC (mniejsza podaż oznacza wzrost cen freonów) i posiadania patentu na produkcję HCFC koncern DuPont zanotował w kolejnych latach nagły i gigantyczny wzrost zysków. Dość powiedzieć, że rząd amerykański zdecydował się na wyjątkowy w gospodarce rynkowej krok, mianowicie zastosował wobec niego „domiar”, czyli wyjątkowe podniesienie podatku względem jednego płatnika (Żylicz, 2016).

PODSUMOWANIE

Protokół montrealwski udowodnił, że jest możliwa skuteczna walka z globalnymi wyzwaniami ekologicznymi – sygnatariuszami porozumienia były wszystkie kraje ONZ. Zarazem pokazał, że kluczowe dla skutecznych działań jest poparcie przemysłu. W przypadku dziury ozonowej było to zaledwie kilka koncernów z branży chemicznej, z decydującym wpływem koncernu DuPont, który w ratyfikacji Protokołu montrealskiego widział szansę na podniesienie swoich zysków. Natomiast w emisję gazów cieplarnianych zaangażowanych jest znacznie więcej podmiotów gospodarczych. Ponadto ostateczne koszty realizacji Protokołu montrealskiego okazały się w skali świata bardzo niskie (na poziomie kilkudziesięciu milionów dolarów rocznie), podczas gdy 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 ten dokument (tylko w ten sposób mogły sprzedawać/kupować freon pochodzący ze Stanów Zjednoczonych, bo państwo to podpisało PM). Niestety, obecnie obowiązujące reguły handlu międzynarodowego przyjęte przez Światową Organizację Handlu (WTO) odebrały porozumieniom ekologicznym możliwość wprowadzania sankcji handlowych (Żylicz, 2016).

W praktyce zatem jedynym mechanizmem wypracowanym w ramach Protokołu montrealskiego, który okazał się sukcesem i pojawia się w porozumieniach dotyczących ograniczania emisji CO₂, jest handel pozwoleniami na emisję, umożliwiający rozluźnienie sztywnych wymagań, które obowiązywałyby, gdyby limity na emisję były niezbywalne.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Opodatkowanie emisji CO₂,
po co kolejny podatek**



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH





**KLIMATYCZNE
ABC**

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997, Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017, Uniwersytet Warszawski

8. 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, aby zrozumieć, że chodzi tu nie o pojawianie się konkretnych zjawisk meteorologicznych, ale o coraz wyraźniejsze odstępstwa od opisujących je dotychczas statystyk: prawdopodobieństwa występowania i nasilania się różnych zjawisk.

Podając 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, jak odczytywać projekcje oraz 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, a także w oceanie i kriosferze.

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

8.1. Zmiana klimatu to zmiana w statystyce zjawisk meteorologicznych

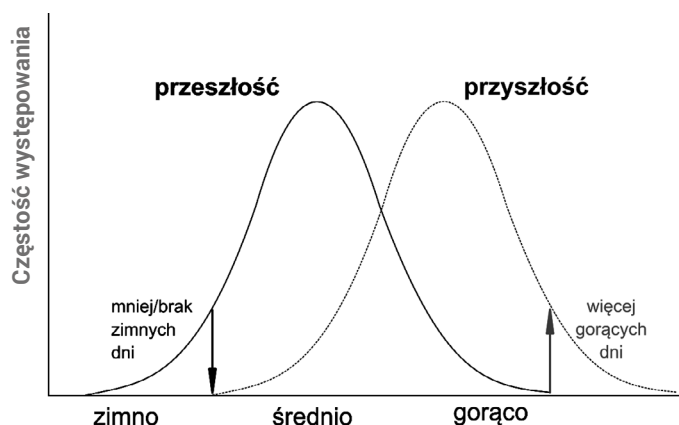
Wzrost ilości energii zgromadzonej w ziemskim systemie klimatycznym powoduje zmiany w częstotliwości występowania (prawdopodobieństwie) i nasileniu zjawisk meteorologicznych.

Klimat Ziemi lub konkretnego regionu opisujemy, podając zestawy wskaźników statystycznych dotyczących występowania i charakterystyki poszczególnych zjawisk meteorologicznych. W wersji skrótowej mogą to być na przykład obliczone na podstawie danych z wielu lat wartości średnie – średnia temperatura roczna, 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 częstotliwości 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

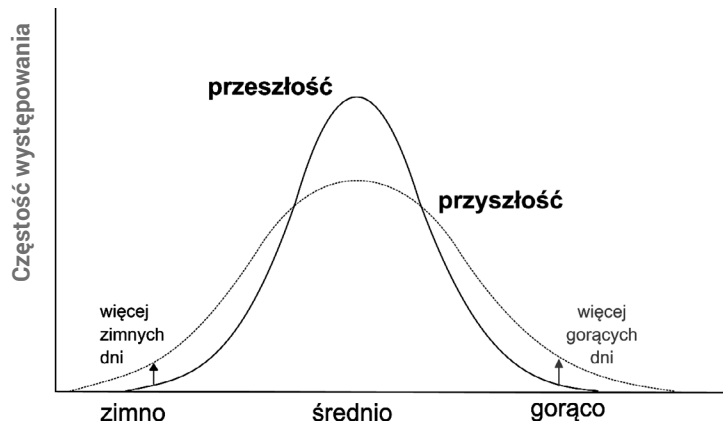
W przypadku wielu wskaźników – na przykład temperatury – typowy rozkład częstości ma kształt zbliżony do rozkładu normalnego (inaczej krzywej dzwonnej czy rozkładu Gaussa). Maksimum takiego rozkładu przypada dla wartości średniej wskaźnika, a o kształcie rozkładu (czy jest wąski i wysoki, czy raczej spłaszczony) mówi jego **wariancja**. Przyjrzyjmy się, co oznaczają zmiany parametrów rozkładu, zakładając, że chodzi o temperaturę (np. zimne, średnio ciepłe i gorące dni, miesiące czy lata; ilustracje 8.1.1a.–8.1.1c.).



Ilustracja 8.1.1a. Znaczenie wzrostu średniej dla częstości występowania wartości skrajnych.

Wzrost średniej oznacza, że cały wykres przesuwają się w stronę większych wartości, a zatem:

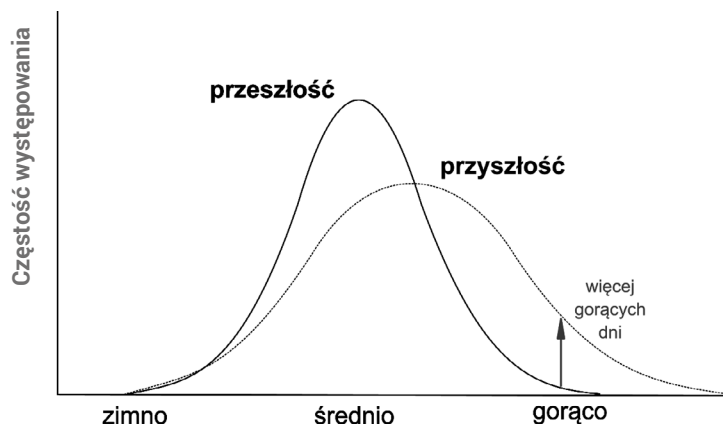
- najczęściej występują wartości wyższe niż dotąd,
- przybywa dni gorących i pojawiają się dni gorętsze, niż dotąd występowały,
- dni zimne występują coraz rzadziej.



Ilustracja 8.1.1b. Znaczenie wzrostu wariacji dla częstości występowania wartości średnich i skrajnych.

Wzrost wariacji 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.



Ilustracja 8.1.1c. Znaczenie wzrostu średniej i wariacji dla częstości występowania wartości średnich i skrajnych.

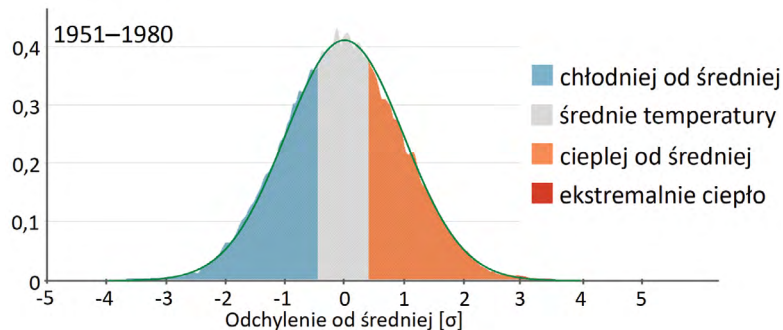
Jednoczesny wzrost średniej i wariacji oznacza, że wykres jednocześnie przesuwa się w stronę wyższych temperatur i rozplaszcza. W rezultacie:

- dni o temperaturze zbliżonej do 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.

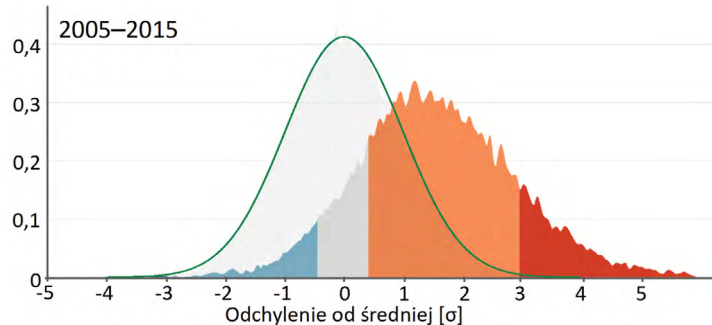
PRZYKŁAD

Spójrzmy na wykres (ilustracja 8.1.2a.) przedstawiający częstość występowania lokalnych odchyłeń od średniej z lat 1951–1980 w przypadku temperatury latem nad lądami półkuli północnej. Wybrano do tego celu dane dla półkuli północnej, ponieważ południową w większym stopniu pokrywa ocean, który pochłania dużą część energii, przez co wzrost temperatury nad lądami jest nad nią mniej wyraźny.

a) Względna częstość występowania



b) Względna częstość występowania



Jak można zauważyć, wykres dla lat 2005–2015 (ilustracja 8.1.2b.) 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, zbliżone do 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.

Ilustracja 8.1.2a. i b. Względna częstość występowania lokalnych odchyłeń temperatury od średniej z lat 1951–1980 obserwowanych latem na półkuli północnej.

Kolorowe wykresy przedstawiają dane dla przedziałów czasowych 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).

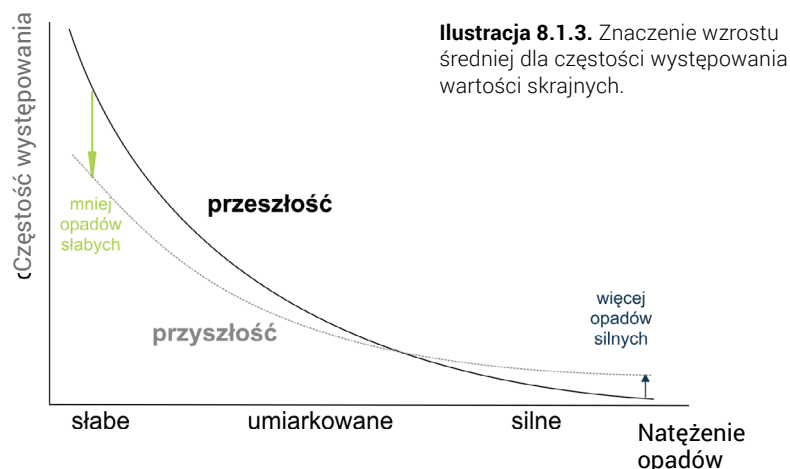
Kolorem niebieskim oznaczono zakres obejmujący w latach 1951–1980 1/3 najchłodniejszych przypadków, pomarańczowym – 1/3 najcieplejszych przypadków. Czerwień wyróżnia zakres ekstremalnie wysokich temperatur, które w latach 1951–1980 występowały tylko w 0,1% przypadków.

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 – sigma). W rozkładzie opisanym krzywą Gaussa do przedziału $\pm \sigma$ należy 68% przypadków.

ROZKŁADY SKOŚNE

Niektóre wskaźniki są opisywane przez rozkłady skośne: jest tak wtedy, kiedy wartości niskie pojawiają się z dużym, a wysokie – z bardzo małym prawdopodobieństwem (albo na odwrót). Należą do nich wskaźniki opadowe, takie jak natężenie czy dobową sumą opadów (ich typowy rozkład przedstawiono na ilustracji 8.1.3.).



W takim przypadku zmiana klimatu może prowadzić do **zmiany skośności**. Trzymając się przykładu opadów, oznacza to, że:

- częstość występowania opadów słabych i umiarkowanych spada,
- częstość występowania opadów silnych rośnie.

Wtedy, 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 osunięciami gruntu wynikającymi z występowania ulewnych deszczy i bardzo obfitych opadów śniegu.

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), w rzeczywistości zmiana może podlegać 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 częściach tego rozdziału.

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

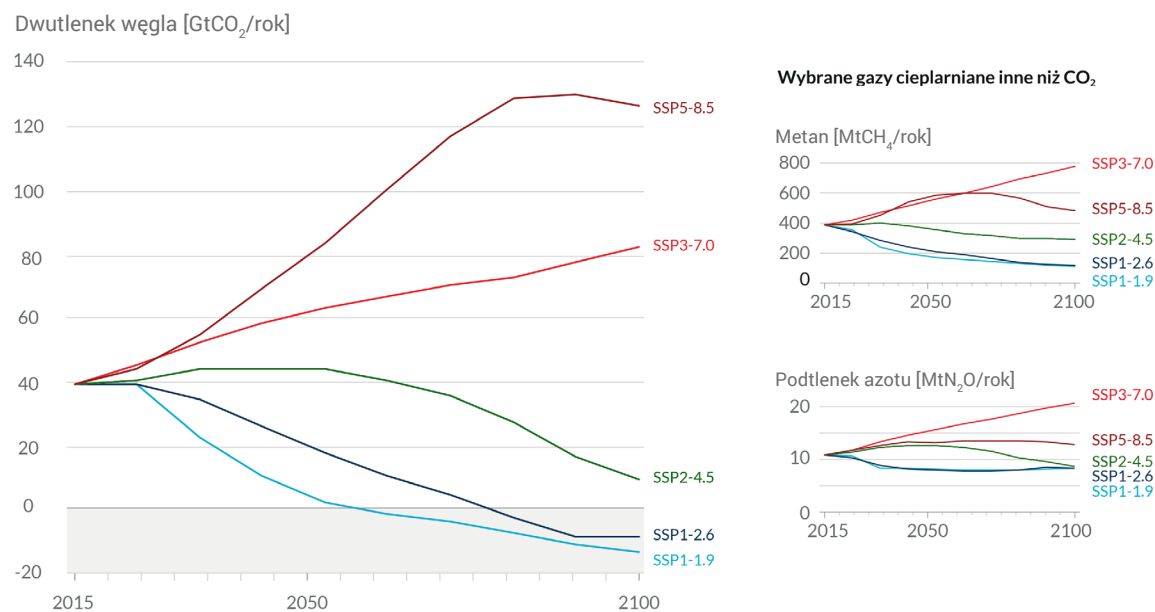
8.2. Scenariusze na przyszłość

Naukowcy przedstawiają różne warianty przyszłości klimatu przy założeniu różnych scenariuszy dalszej emisji gazów cieplarnianych.

Czytając o skutkach zmiany klimatu w przyszłości, spotkasz się z pojęciami „scenariuszy emisji” lub „ścieżek koncentracji”. Pojawiły się one dlatego, że chociaż naukowcy potrafią opisać zachodzące w ziemskim systemie klimatycznym zjawiska fizyczne, chemiczne i nawet biologiczne za pomocą równań, to nie są w stanie z podobną precyzją przedstawić zmian, jakie nastąpią (lub nie nastąpią) w światowej gospodarce. Te ostatnie zależą nie tylko od praw przyrody, ale i od decyzji podejmowanych przez wielu ludzi na całym świecie. Nie wiemy, czy ludzkość będzie dalej stosować te same co dotąd rozwiązania społeczne i techniczne, ani czy będzie emitować stale coraz więcej gazów cieplarnianych aż do wyczerpania zasobów paliw kopalnych, czy może zacznie ograniczać te emisje, a jeśli tak, to w jakim tempie będzie to robić. Aby sformułować projekcję dotyczącą klimatu, trzeba przyjąć jakieś założenia, i tym właśnie jest wybór jednego ze scenariuszy.

W bardziej kompleksowych opracowaniach znajdziemy zazwyczaj wyniki nie dla jednego, lecz dla dwóch lub większej liczby scenariuszy. Mogą to być na przykład **reprezentatywne ścieżki koncentracji** (*Representative Concentration Pathways*, RCP). Zestaw ten zawiera cztery grupy scenariuszy, w których koncentracje gazów cieplarnianych zmieniają się w przyszłości 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). Wyniki obliczeń z ich użyciem można było znaleźć w Piątym Raplocie Podsumowującym Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu (Stocker i in., 2013). Reprezentatywne ścieżki koncentracji nie nawiązywały do żadnych konkretnych założeń dotyczących rozwoju gospodarki. Służyły do ustalenia, jak określone zmiany w koncentracji gazów cieplarnianych wpłyną na klimat.

Projekcje klimatu to wyniki obliczeń z użyciem komputerowych modeli klimatu. Przedstawiają zachowanie klimatu przy założeniu określonego scenariusza wymuszeń (zmian w koncentracji gazów cieplarnianych, natężeniu promieniowania słonecznego, albedo planetarnym).



Ilustracja 8.2.1. Antropogeniczne emisje najważniejszych gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmiany klimatu w okresie 2015–2100 według pięciu przykładowych scenariuszy (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 i SSP5-8.5). Krzywe obrazują emisje dwutlenku węgla (CO₂, w GtCO₂/rok, po lewej), metanu (CH₄, w MtCH₄/rok, prawy górny wykres) oraz podtlenku azotu (N₂O, w MtN₂O/rok, prawy dolny wykres).

Źródło: IPCC, 2021.

W nowszych publikacjach naukowcy posługują się określeniem: Wspólne Ścieżki Rozwoju Społeczno-Ekonomicznego (*Shared Socio-economic Pathways*, SSP), które w przeciwieństwie do RCP opracowano z udziałem specjalistów nauk społecznych i ekonomicznych. W tym przypadku zmiany koncentracji gazów cieplarnianych są powiązane z określonymi zmianami w emisjach, które z kolei wynikają z przykładowych ścieżek rozwoju, jakie może wybrać ludzkość. W Szóstym Raplocie Podsumowującym Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu oznaczono je symbolami SSP (ilustracja 8.2.1.), z dopiskiem na temat wymuszania radiacyjnego w 2100 roku – analogicznie do oznaczeń RCP (IPCC, 2021). W skrócie można opisać je następująco (za: Riahi i in., 2017):

- **SSP1 (np. SSP1-1.9, SSP1-2.6) – droga do równowagi.** Społeczeństwa i rządy działają zgodnie na rzecz rozsądnego korzystania z dóbr wspólnych, ochrony środowiska naturalnego i zmniejszania nierówności. Rozpowszechnienie edukacji i opieki medycznej ogranicza przyrost liczby ludności, w drugiej połowie bieżącego stulecia populacja spada. Państwa koncentrują się na poprawie jakości życia swoich obywateli. Dąży się do zmniejszania ilości energii i zasobów potrzebnych do zaspokajania ich potrzeb.

ZAPAMIĘTAJ!

Ani ustabilizowanie, ani nawet spadek emisji długo utrzymujących się w atmosferze gazów cieplarnianych (takich jak dwutlenek węgla) nie wystarczą do zatrzymania wzrostu ich koncentracji w powietrzu.

Jak podkreślaliśmy w poprzednich rozdziałach, naturalne procesy usuwające CO₂ z atmosfery nie równoważą bieżących emisji antropogenicznych. Każda nowo wprowadzona w obieg porcja gazu zwiększa całkowitą, historyczną sumę emisji, z którą procesy te muszą się uporać.

- **SSP2 (np. SSP2-4.5) – droga pośrednia.** Utrzymują się dotychczasowe trendy społeczne, ekonomiczne i techniczne. Instytucje krajowe i międzynarodowe działają na rzecz polepszania jakości życia ludzi (ochrony zdrowia, dostępu do edukacji, wody i żywności itd.) oraz ochrony środowiska, jednak postęp w tych dziedzinach jest powolny. Rozwój społeczeństw i wzrost dochodów zachodzą nierównomiernie, utrzymują się nierówności między krajami i ich obywatelami. Populacja rośnie w umiarkowanym tempie, a w drugiej połowie bieżącego stulecia stabilizuje się. Tempo degradacji środowiska trochę spowalnia, spada energochłonność i zasobochłonność gospodarki.
- **SSP3 (np. SSP3-7.0) – regionalna rywalizacja.** Przebudzenie nacjonalizmów, konflikty regionalne oraz troska o bezpieczeństwo i konkurencyjność rynkową popychają rządy do koncentrowania się na problemach wewnętrznych lub regionalnych. Poszczególne państwa zajmują się zapewnieniem energii i żywności dla własnych obywateli. Postęp techniczny i ekonomiczny spowalniają, zaspokojenie potrzeb ludności wiąże się z dużym zużyciem zasobów. Populacja rośnie: w krajach uprzemysłowionych – powoli, w rozwijających się – szybko. Mały nacisk na ochronę środowiska prowadzi do jego silnej degradacji w niektórych regionach.
- **SSP4 – nierówności.** Nierówności pomiędzy krajami i ich obywatelami narastają. Rozwarstwienie między społecznościami zamożnymi, wpływowymi i wykształconymi a ubogimi, słabo wykształconymi i pracującymi fizycznie staje się coraz wyraźniejsze. Nasilają się konflikty społeczne. Rozwój techniki postępuje szybko, ale tylko w niektórych regionach i sektorach gospodarki. Inwestuje się zarówno w energetykę opartą na paliwach kopalnych, jak i nieemisyjną. Działania związane z ochroną środowiska dotyczą przede wszystkim problemów lokalnych w regionach średnio- i bardzo zamożnych. Populacja rośnie w umiarkowanym tempie, a w drugiej połowie bieżącego stulecia zaczyna lekko spadać.
- **SSP5 (np. SSP5-8.5) – rozwój oparty na dalszym użyciu paliw kopalnych.** Powszechnie przyjętym priorytetem jest rozwój gospodarczy, techniczny, edukacja, ochrona zdrowia, wzmacnianie współpracy i współdecydowania przez członków społeczeństwa. Wiąże się to jednak z dalszym intensywnym wykorzystaniem paliw kopalnych oraz rozpowszechnieniem stylów życia wymagających dużego zużycia energii i zasobów. W połowie bieżącego stulecia populacja osiąga maksimum i zaczyna spadać. Społeczeństwa radzą sobie z lokalnymi problemami środowiskowymi, takimi jak zanieczyszczenie powietrza.

Wszystkie scenariusze uwzględniają zarówno zmiany koncentracji wszystkich istotnych gazów cieplarnianych, jak i różnego rodzaju zanieczyszczeń powietrza wpływających na albedo planetarne. Nie spodziewamy się, by któryś z nich został w 100% zrealizowany w przyszłości. Rzeczywisty przebieg zmian emisji i koncentracji gazów cieplarnianych prawdopodobnie wypadnie pomiędzy którąś parą z przykładowych „ścieżek”. Podobnie powinno być z konsekwencjami tych zmian.

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

8.3. Zmiany w pogodzie

Zmiana klimatu przynosi częstsze i dłuższe upały, zwiększone prawdopodobieństwo susz i powodzi oraz pociąga za sobą wiele zmian w dynamice zjawisk atmosferycznych.

Szczegółowy opis wszystkich zmian, jakie następują w globalnych i lokalnych procesach i zjawiskach atmosferycznych, wymagałby przygotowania obszernego atlasu. Ten podrozdział ma za zadanie jedynie ułatwić ogólną orientację w kierunkach i skali zmian zachodzących na świecie i w Polsce.

CORAZ CIEPLEJ, CORAZ WIĘCEJ UPAŁÓW

W rezultacie zwiększenia się 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 w stacjach meteorologicznych na wysokości 2 metrów nad gruntem. Dla każdej stacji wyznacza się średnią klimatyczną dla wybranego okresu referencyjnego i **anomalie**. Globalną średnią z takich anomalii określa się mianem średniej anomalii temperatury powierzchni Ziemi. Zmiana jej wartości świadczy o średniej zmianie temperatury powietrza przy powierzchni planety (często mówimy w uproszczeniu o zmianie średniej temperatury).

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl
Co to właściwie jest anomalia?

NAUKA O KLIMACIE
DLA SCYPTICZNYCH

ANOMALIA – odchylenie od wartości średniej. W klimatologii najczęściej oznacza odchylenie od wartości zaobserwowanej w konkretnym pomiarze lub średniej dla wybranego roku od średniej wieloletniej, obliczonej na podstawie pomiarów z określonego okresu referencyjnego.

DEFINICJA

OKRES REFERENCYJNY – przedział czasowy (zwykle trzydziestoletni lub dłuższy), na podstawie którego ustala się średnią wartość wybranego parametru służącą do określania anomalii.

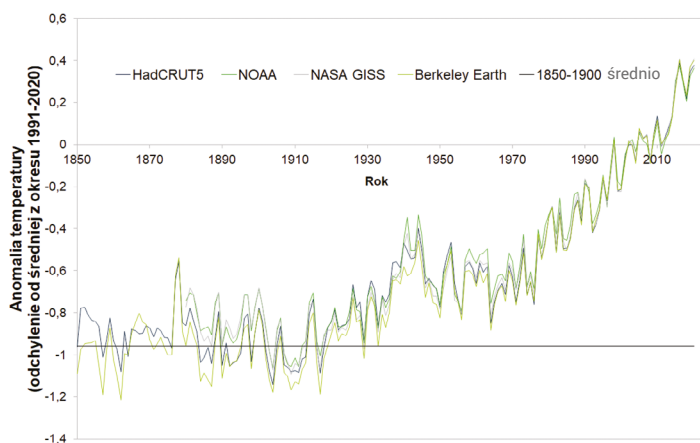
DEFINICJA

Zgodnie z propozycją Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu za okres referencyjny odpowiadający w przybliżeniu czasom przedprzemysłowym uznaje się lata 1850–1900 (IPCC, 2018).

Jak można zauważyć na ilustracji 8.3.1., z roku na rok średnie anomalie temperatury wahają się, co jest przejawem naturalnej zmienności pogodowej. Kiedy jednak weźmiemy pod uwagę zmiany wieloletnie, okaże się, że w dekadzie 2011–2020 średnia temperatura powierzchni Ziemi była o ok. 1,09°C wyższa niż w czasach przedprzemysłowych (IPCC, 2021). Ostatnie okresy, pięcioletni (2016–2020) i dziesięcioletni (2011–2020), były najcieplejszymi w historii pomiarów (WMO, 2021).

Ilustracja 8.3.1. Zmiany średniej temperatury powierzchni Ziemi względem okresu referencyjnego 1991–2020, w stopniach Celsjusza. Na wykresie przedstawiono wyniki analiz czterech różnych zespołów badawczych. Linia przerywana obrazuje wartość średnią z lat 1850–1900 (przybliżenie stanu dla czasów przedprzemysłowych).

Dane: NASA GISS, Met Office Hadley Centre, NOAA, Berkeley Earth.



Zmiany temperatury w różnych częściach świata zachodzą w różnym tempie. Najszybszy wzrost temperatury obserwujemy w pobliżu bieguna północnego (ilustracja 8.3.2.). Jest to związane z opisywanym we wcześniejszych rozdziałach sprzężeniem między temperaturą wody, zasięgiem lodu morskiego i ilością pochłanianego przez powierzchnię Ziemi promieniowania słonecznego. Średnio 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.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Mit: Zmiany klimatu są powodowane zmianami prądów morskich

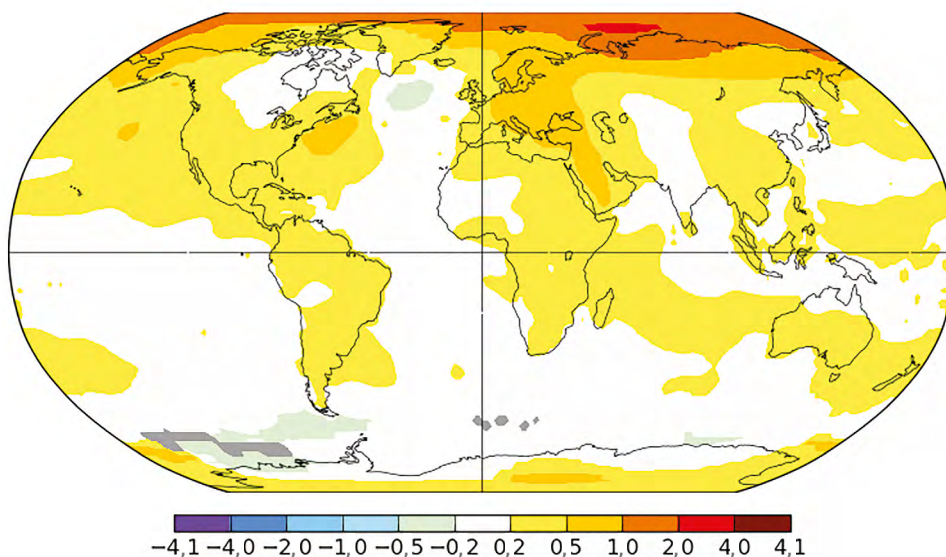
„Pauza w ociepleniu” a wiatry nad Pacyfikiem

Mit: Za globalne ocieplenie odpowiada El Niño

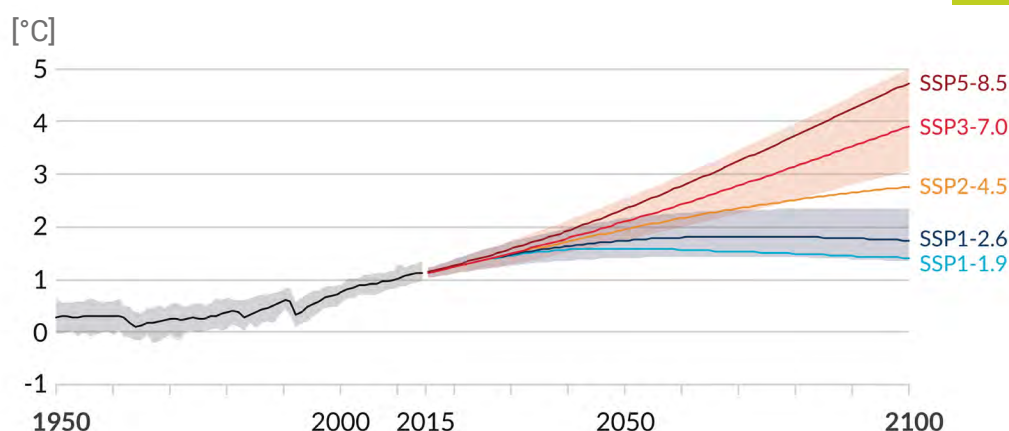


Ilustracja 8.3.2. Anomalie temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi względem okresu referencyjnego 1991–2020, w stopniach Celsjusza. Dane dla dziesięciolecia 2011–2020.

Źródło: NASA GISS.



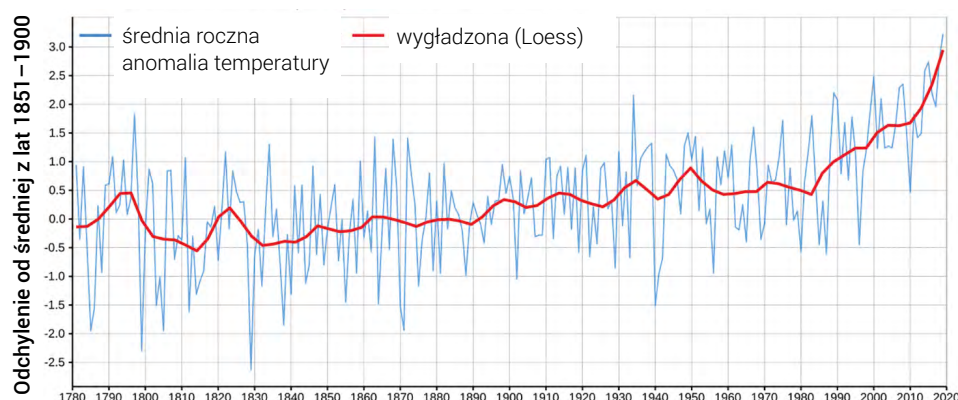
W przyszłości spodziewamy się dalszego wzrostu średniej temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi. To, jak długo będzie postępował i jak daleko zajdzie, zależy od zmian w światowej gospodarce. Jak przedstawiono na ilustracji 8.3.3., stosunkowo szybki spadek emisji i ustabilizowanie koncentracji gazów cieplarnianych (scenariusze SSP1-1.9 i SSP1-2.6) dają szansę na ustabilizowanie średniej temperatury jeszcze w XXI wieku na poziomie o ok. 1,5–2°C wyższym niż w czasach przedprzemysłowych. Dalszy wzrost emisji (scenariusze SSP3-7.0 i SSP5-8.5) 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 (rozdział 1.).



Ilustracja 8.3.3. Historyczne pomiary (linia czarna) i projekcje (linie kolorowe) globalnej średniej temperatury powierzchni Ziemi w pięciu scenariuszach przyszłych emisji gazów cieplarnianych. Kolorowe pasy pokazują zakres możliwych wartości temperatury dla scenariuszy SSP1-2.6 oraz SSP3-7.0.

Źródło: IPCC, 2021.

Wzrost średniej temperatury obserwujemy również w Polsce (ilustracja 8.3.4.). W latach 1951–2020 średni trend wynosił ok. 0,29°C/10 lat (IMGW, 2021), był więc około dwukrotnie wyższy niż trend globalny. To efekt naszego położenia geograficznego – na półkuli północnej, bliżej 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).



Ilustracja 8.3.4. Zmiany temperatury w Polsce. Linia niebieska – średnia roczna anomalia temperatury (odchylenie od średniej z lat 1851–1900), linia czerwona – dane wygładzone.

Źródło: Djaków, 2020.

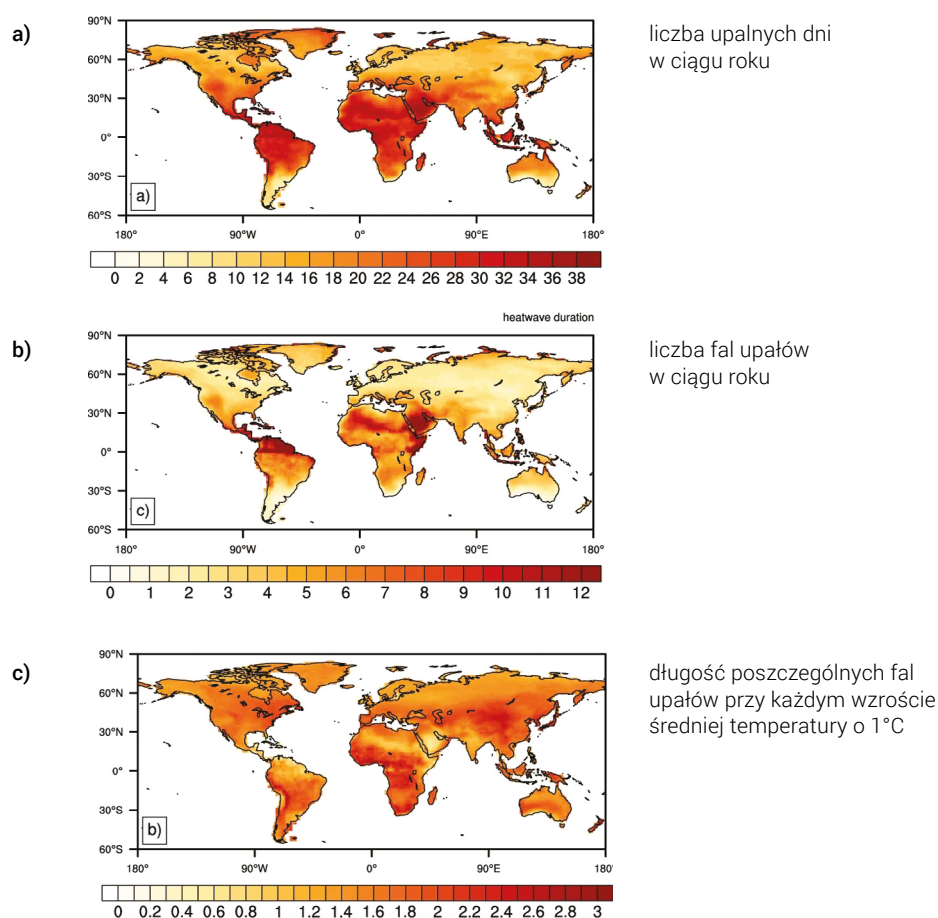
CZY WIESZ, ŻE ?

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).

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 mapy na ilustracji 8.3.5. Zauważ, że i w tym przypadku zmiany nie przebiegają tak samo na całym świecie. Najsilniejszy wzrost 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, że prawie każde lato jest cieplejsze niż w okresach wcześniejszych, co roku można się więc spodziewać wielu upalnych dni.

Ilustracja 8.3.5. Przeciętna zmiana w: (a) liczbie upalnych dni w ciągu roku; (b) liczbie fal upałów w ciągu roku; (c) długości poszczególnych fal upałów przy każdym średnim wzroście temperatury o 1°C.

Źródło: Perkins-Kirkpatrick i Gibson, 2017.



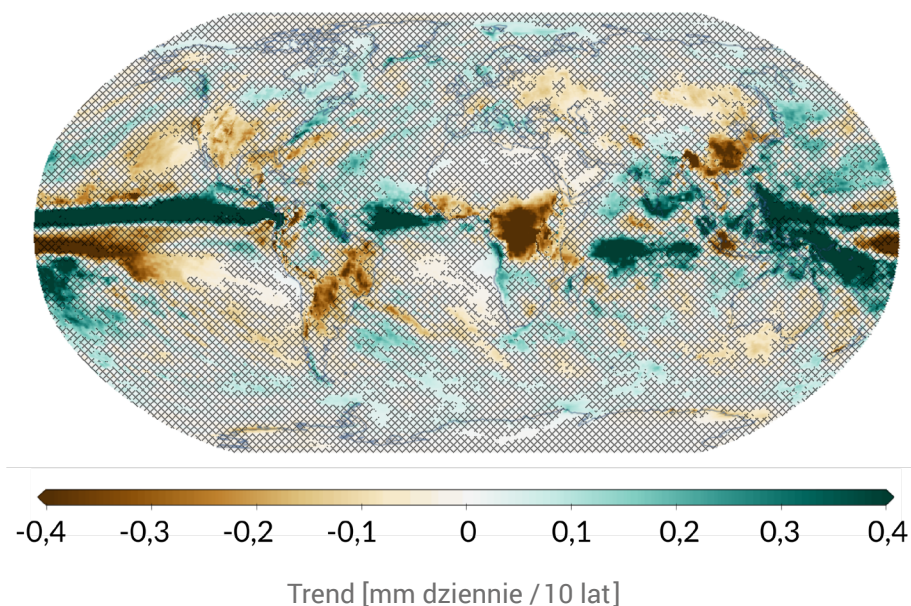
W Europie od roku 1880 fale upałów wydłużyły się dwukrotnie, a gorące dni są dziś trzykrotnie bardziej prawdopodobne niż dawniej (Hov i in., 2013). Obserwujemy to również w Polsce: w latach 1951–1990 dni z temperaturami powyżej 30°C było u nas kilka w ciągu roku, obecnie jest ich kilkanaście, a w przyszłości ta liczba będzie rosła, nawet do ok. 50 w roku 2100, zakładając scenariusz silnie rosnących emisji gazów cieplarnianych (Djaków, 2019).

OPADY

W przypadku opadów nie mamy globalnie 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, jednak to, gdzie i ile spadnie deszczu, zależy nie tylko od ilości pary wodnej dostającej się do atmosfery, ale również od:

- ukształtowania terenu (na przykład gdy wilgotna masa powietrza przesuwana się nad górami, można się spodziewać deszczu na stoku nawietrznym, ale na zawietrznym oraz za górami opady mogą się wcale nie pojawić),
- 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 (ilustracja 8.3.6.). Najczęściej mamy do czynienia z zaostrzaniem, a nie łagodzeniem kontrastów: więcej deszczu pada tam, gdzie i tak było go pod dostatkiem, na przykład na północy Europy, a mniej tam, gdzie i tak było sucho – m.in. na południu Australii i w basenie Morza Śródziemnego (Trenberth, 2011).



Projekcje (ilustracja 8.3.7.) wskazują, że przyszłe zmiany w rocznych sumach opadów często nie będą znacząco wykraczać poza zakres ich naturalnej zmienności, jednak im więcej gazów cieplarnianych zostanie wyemitowanych do atmosfery, tym zmiany te będą wyraźniejsze. Spodziewane są dalsze wzrosty sum opadów w rejonach szerokości umiarkowanych i podbiegunowych oraz spadki w okolicach zwrotników (IPCC, 2013).



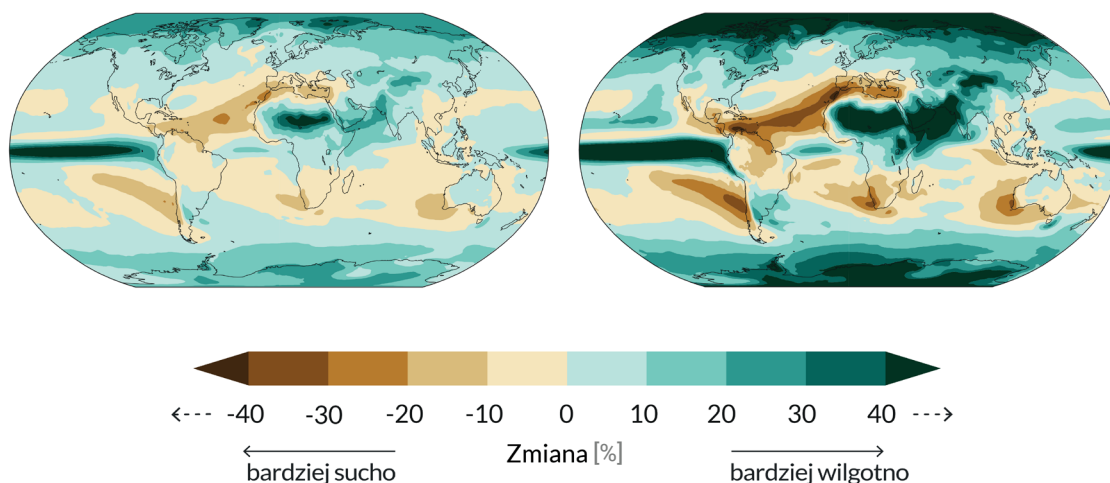
O obserwowanych i przewidywanych zmianach w temperaturach występujących w naszym kraju przeczytasz w dostępnej w Internecie książce pod redakcją Z.W. Kundzewicza, Ø. Hova, T. Okruszki (2017). **Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce.**

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.

Ilustracja 8.3.6. Średnie dekadowe trendy dziennych sum opadów w latach 1980–2015. Kratka oznacza regiony, w których trend był nieistotny statystycznie. Dane pochodzą z wykonanej przez ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, czyli Europejskiego Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody) reanalizy ERA5, polegającej na odtworzeniu przebiegu zjawisk z użyciem modelu komputerowego na podstawie danych pomiarowych.

Źródło: Gutiérrez i in., 2021; Iturbide i in., 2021.



Ilustracja 8.3.7. Przewidywana zmiana średnich opadów rocznych (w %) w poszczególnych lokalizacjach w stosunku do okresu 1850–1900 przy wzroście średniej globalnej temperatury o 2°C (po lewej) i 4°C (po prawej). Uwaga: dla regionów suchych stosunkowo mała zmiana bezwzględna może okazać się dużą zmianą procentową.

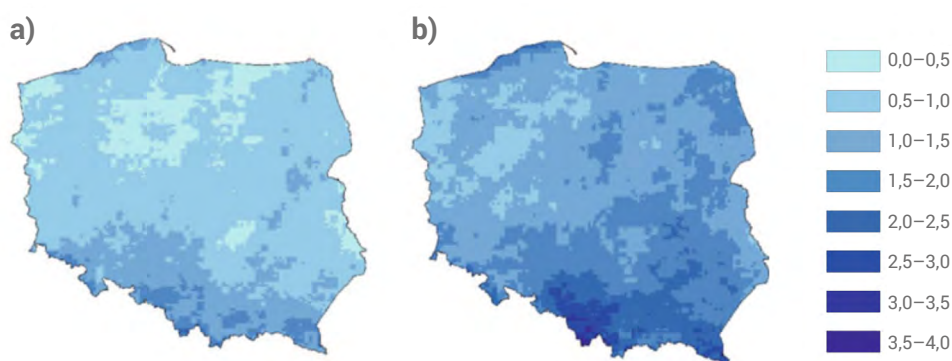
Źródło: IPCC, 2021.

W Polsce obecnie zmiany w rocznych sumach opadów są niewielkie, lekkie przyrosty obserwujemy w północnej części kraju oraz na Podkarpaciu (Łupikarsza i Małarzewski, 2021). W przyszłości należy jednak spodziewać się silniejszych wzrostów. W latach 2071–2100 niemal w całym kraju roczne sumy opadów będą wyższe o ponad 100 mm, jeśli emisje gazów cieplarnianych będą dalej rosły, lub o ponad 50 mm, jeśli w drugiej połowie XXI wieku zaczną spadać (Pińskwar i Choryński, 2021). Wzrosty dotyczyć będą przede wszystkim miesięcy zimowych – grudnia, stycznia i lutego (Szwed, 2019).

Coraz częściej występują u nas opady intensywne, czyli dni, kiedy dobową sumę opadów przekracza 10 lub nawet 20 mm (Klimada, 2020), a także związane z nimi powodzie błyskawiczne (Ostrowski i in., 2012). Jednocześnie wydłużają się jednak okresy bez opadów (Szwed i in., 2007), co w połączeniu z nasilonym przez wzrost temperatury parowaniem sprzyja występowaniu susz. Projekcje przedstawione na ilustracji 8.3.8. wskazują, że w kolejnych dekadach trendy te będą się utrzymywać (Pińskwar i Choryński, 2021).

Ilustracja 8.3.8a. i b. Projekcje zmian w liczbie dni z dobową sumą opadów powyżej 20 mm w ciągu roku dla okresu 2071–2100 względem okresu 1971–2000, dla dwóch scenariuszy: a) RCP4.5, w którym w drugiej połowie XXI wieku koncentracje gazów cieplarnianych stabilizują się, b) RCP8.5, w którym koncentracje gazów cieplarnianych dalej rosną.

Źródło: Pińskwar i Choryński, 2021.



ZJAWISKA BURZOWE I PRĘDKOŚCI WIATRU

Do powstawania ekstremalnych zjawisk pogodowych, takich jak burze czy cyklony tropikalne, niezbędne są duże ilości energii. Nasilanie się efektu cieplarnianego i gromadzenie w ziemskim systemie klimatycznym (na lądzie, ale przede wszystkim – w oceanie) dodatkowej energii sprzyja 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 spowodowane 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, co powoduje, że 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, w których kiedyś te zjawiska nie występowały (Knutson i in., 2019a),
- zagrożenie wezbraniami sztormowymi terenów położonych coraz dalej w głąb lądu.

Przy dalszym wzroście średniej temperatury powierzchni Ziemi naukowcy spodziewają się kontynuacji tych trendów.

Rozwój burzy to niezwykle skomplikowany proces, w którym istotną rolę odgrywa wiele czynników. Niektóre z nich nasilają się w wyniku globalnego ocieplenia, podczas gdy inne słabną; w dodatku zjawisko to może zależeć od warunków lokalnych (takich jak ukształtowanie i pokrycie powierzchni terenu). Obserwacje prowadzone w Polsce nie wskazują na razie na zmiany w częstotliwości występowania burz (Bielec-Bąkowska i in., 2021).

Z wyjątkiem wybrzeża, w naszym kraju nie obserwuje się aktualnie wzrostu maksymalnych prędkości wiatru, co prawdopodobnie wiąże się z rosnącą szorstkością powierzchni – coraz większa liczba zabudowań, coraz gęstsza infrastruktura itd. mogą ograniczać prędkości, jakie rozwija powietrze w pobliżu ziemi (Wibig, 2021).

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. Omówimy teraz dwa z nich oraz wpływ, jaki wywiera na nie globalne ocieplenie.



O zmianach w występowaniu cyklonów tropikalnych więcej przeczytasz w artykułach opublikowanych na stronie www.naukaoklimacie.pl

Huragany – skąd się biorą, jak się ją zniszczenie i jak wpływa na nie zmiana klimatu?

Coraz silniejsze huragany [i nie jest to drobny efekt]



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYKÓW

CZY WIESZ, ŻE ?

Cyklon tropikalny, huragan i tajfun to różne określenia podobnych zjawisk. Cyklon tropikalny to nazwa ogólna, huragan oznacza najsilniejsze cyklony występujące na Atlantyku i wschodniej części Pacyfiku, tajfuny zaś to najsilniejsze cyklony nad zachodnim Pacyfikiem.

DEFINICJA**CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA** – ogół przepływów powietrza.**KOMÓRKI HADLEYA**

Komórki Hadleya (ilustracja 8.3.9.) obejmują następujące zjawiska:

- 1** W rejonie równika powietrze silnie nagrzewa się od powierzchni Ziemi i unosi do góry (towarzyszy temu powstawanie rozbudowanych chmur i silnych opadów).
- 2** Po dotarciu do tropopauzy powietrze rozplywa się na boki w stronę zwrotników. Powstający w ten sposób wiatr nazywamy antypasatem.
- 3** W okolicach zwrotnika powietrze osiada, w rezultacie ze zwiększonym prawdopodobieństwem występują tu suche wyży, czyli pozbawione opadów obszary podwyższonego ciśnienia.
- 4** Powietrze dociera do powierzchni Ziemi i rozplywa się na boki, częściowo powracając w stronę równika. Wiatry wiejące od zwrotników do równika nazywamy pasatami.

W wyniku zmiany klimatu obserwujemy poszerzanie się zasięgu komórek Hadleya, co oznacza, że strefa suchych wyżów zaczyna średnio sięgać dalej w stronę biegunów, wkraczając na przykład nad rejony Morza Śródziemnego czy południową Australię.

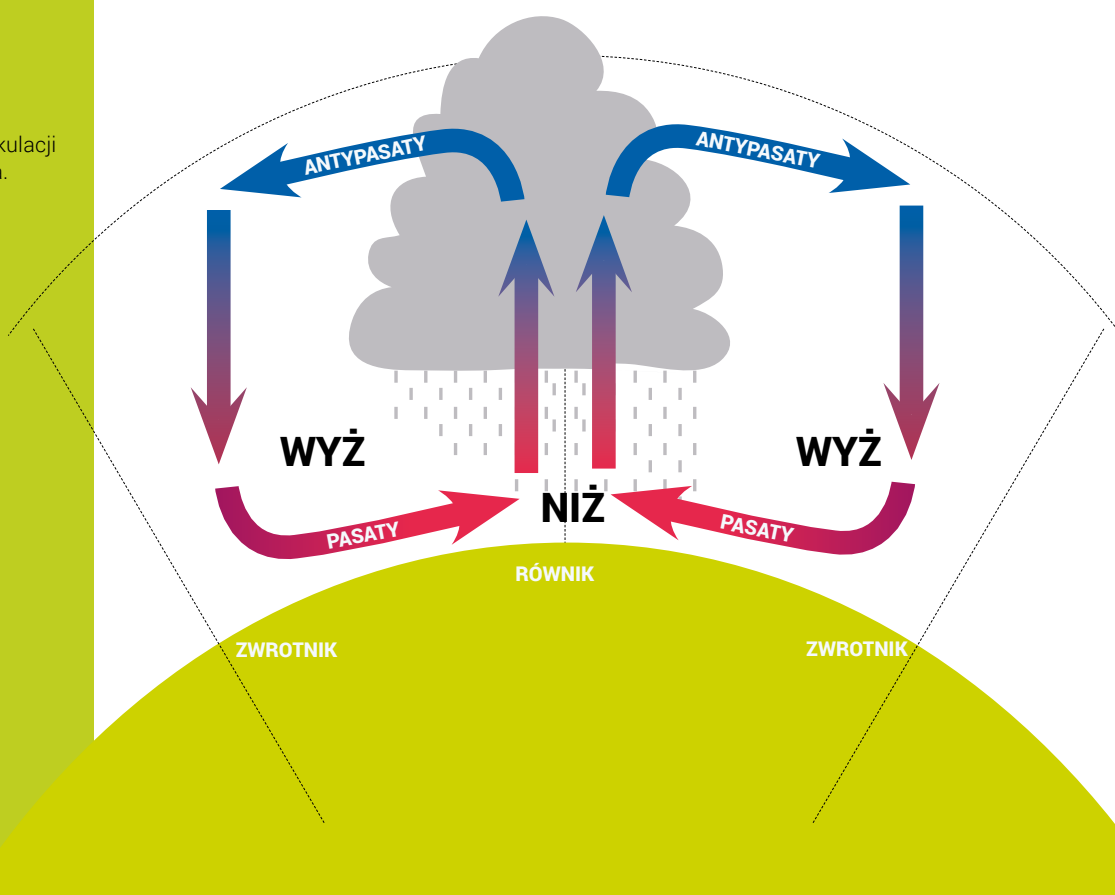
Jeśli chcesz dowiedzieć się, jakie konsekwencje mogą mieć te i inne zmiany w cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej, przeczytaj artykuły na stronie www.naukaoklimacie.pl:

ABC pożarów w Australii

Kampania pomiarowa EUREC4A, czyli jak się bada chmury i klimat



Ilustracja 8.3.9. Schemat cyrkulacji powietrza w komórce Hadleya.



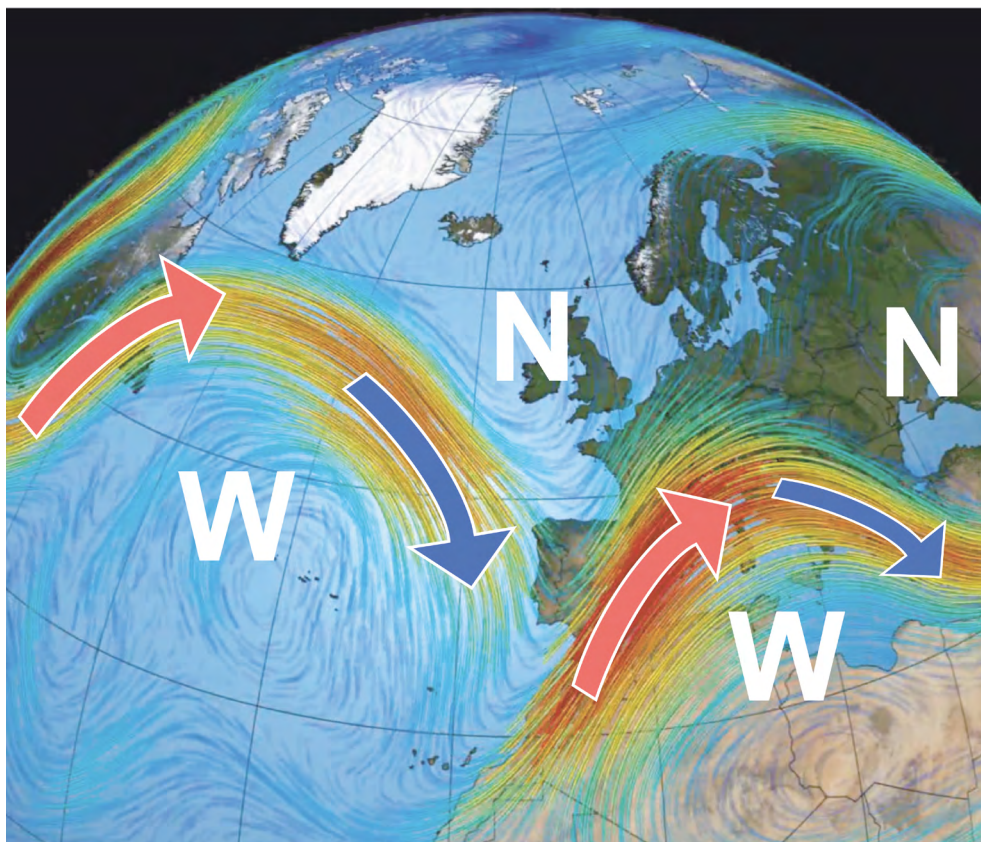
STREFA NIŻÓW UMIARKOWANYCH SZEROKOŚCI I ZWIĄZANY Z NIĄ PRĄD STRUMIENIOWY

W umiarkowanych szerokościach geograficznych spotykają się masy powietrza chłodnego (płynącego znanad biegunów) i ciepłego (napływającego ze strony zwrotnika). W niższych warstwach atmosfery regularnie tworzą się i zanikają **niże atmosferyczne** – obszary obniżonego ciśnienia o średnicy rzędu setek kilometrów, w których powietrze wiruje wokół centrum i które najczęściej przemieszczają się na wschód. Towarzyszą im **wyże** – obszary podwyższonego 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 tzw. **prąd strumieniowy** – strefa szybkich wiatrów wiejących z zachodu na wschód, odpowiadająca za zmiany pogody z dnia na dzień i z tygodnia na tydzień.

Przy dużej różnicy temperatur między masami powietrza z południa i północy prędkości wiatru w prądzie strumieniowym są duże, a nad Europą przemieszczają się kolejne niże atmosferyczne przynoszące wilgotne powietrze znanad 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 (jak na ilustracji 8.3.10.). Wyże i niże powstające w jego meandrach mają charakter stacjonarny i (zależnie od położenia) powodują w określonych obszarach przedłużone napływy mas powietrza arktycznego lub zwrotnikowego, czego skutkiem są długie okresy mało zmiennej pogody z małą ilością opadów (w głąb kontynentu nie dociera wilgoć znanad Atlantyku).



Ilustracja 8.3.10. 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. Kolorowe strzałki pokazują kierunki napływu ciepłych (czerwone) i chłodnych (niebieskie) mas powietrza. Duże litery „W” oznaczają obszary wyżów, a „N” – niżów atmosferycznych.

Tło – wizualizacja NASA Visualization Studio.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Fale na froncie

Przesunięte chmury



Jak już wiesz, najszybciej ogrzewającym się rejonem Ziemi są okolice bieguna północnego. Oznacza to, że różnica temperatur między 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).

ZACHMURZENIE

Zmiana klimatu powoduje także zmiany w średnim **zachmurzeniu** – miejscach i wysokościach, na których występują chmury, oraz w przeciętnym czasie ich utrzymywania się. 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 silniej ograniczają ucieczkę promieniowania ziemskiego w kosmos.

Oba efekty sprzyjają silniejszemu ocieplaniu się Ziemi.



ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

SZYMON MALINOWSKI

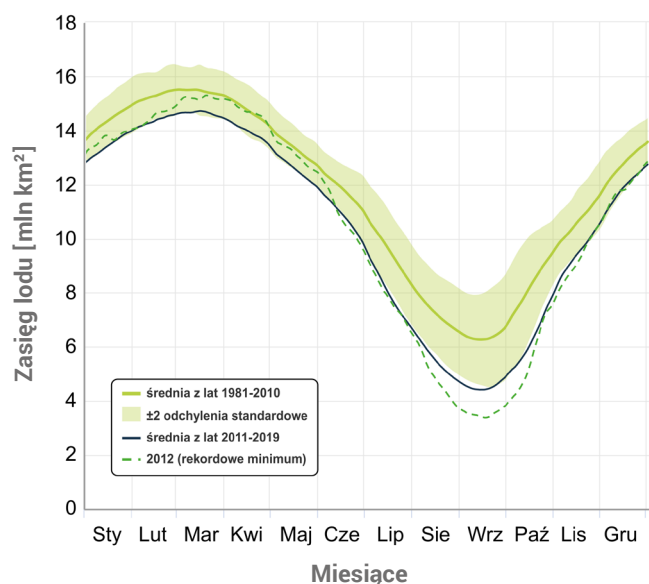
ORCID 0000-0003-4987-7017
Uniwersytet Warszawski

8.4. 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 (ilustracja 8.4.1). Lód młody, jednoroczny, ma grubość rzędu 1–1,5 metra. Jeśli przetrwa sezon topnienia, może w kolejnych latach zwiększyć ją do 3 metrów (a lokalnie nawet 8–10 metrów, w wyniku pękania i kolizji; ilustracje 8.4.2.–8.4.4.).



Ilustracja 8.4.1. 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 standardowego, średnią z lat 2011–2020 oraz przebieg dla roku 2012, w którym odnotowano rekordowo małe (do roku 2021 włącznie) roczne minimum zasięgu lodu.

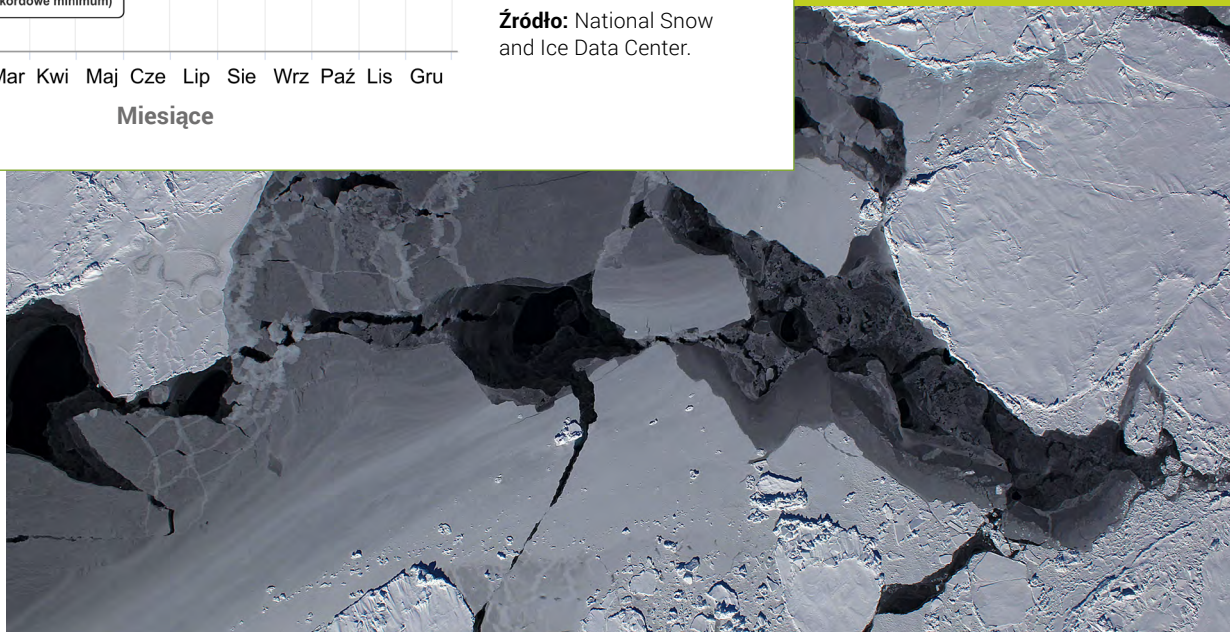
Źródło: National Snow and Ice Data Center.

CZY WIESZ, ŻE ?

Lód morski jest zazwyczaj poprzecinany szczelinami, co utrudnia określenie jego powierzchni. Dlatego zamiast niej często używa się wielkości nazywanej **zasięgiem lodu morskiego** (*extent*), a oznaczającą powierzchnię obszaru, który jest przynajmniej w 15% pokryty lodem (NSIDC, 2020). To łatwiejsze do ustalenia, podobnie jak łatwiej jest określić obszar, jaki zajmuje plasterk sera z dziurami niż dokładną powierzchnię samego sera (z pominięciem dziur).

Ilustracja 8.4.2. Fragmenty lodu morskiego w różnym wieku (im lód cieńszy i bardziej przejrzysty, tym młodszy).

Zdjęcie: Michael Studinger, NASA/GSFC.

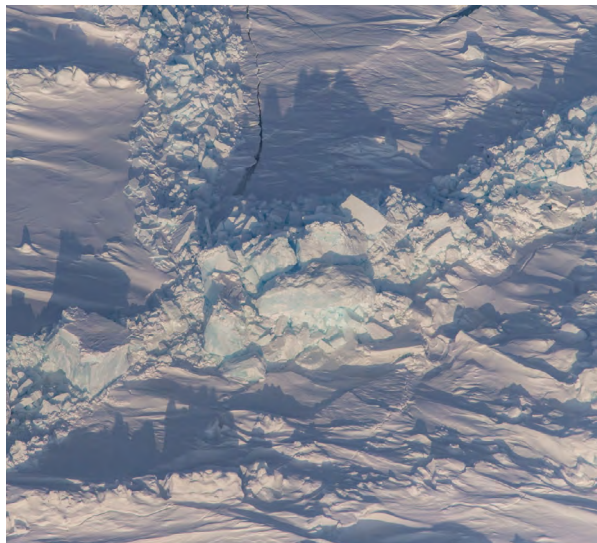


CZY WIESZ, ŻE ?

Połacie lodu mogą pękać pod wpływem falowania, a następnie na siebie wpadać. Gdy dwie olbrzymie kry nacierają na siebie, część lodu w strefie zgniotu jest wypychana do dołu i do góry. Powoduje to powstawanie poważnych deformacji – grzbietów na powierzchni i wyrostków na spodzie. Dlatego lód morski niekoniecznie ma gładką powierzchnię, a im jest starszy, tym większą miewa grubość.

Ilustracja 8.4.4. Lód morski z widocznymi pęknięciami i strefą, w której – w wyniku napierania na siebie tafli lodu – powstaje grzbiet.

Zdjęcie: Jeremy Harbeck, NASA.

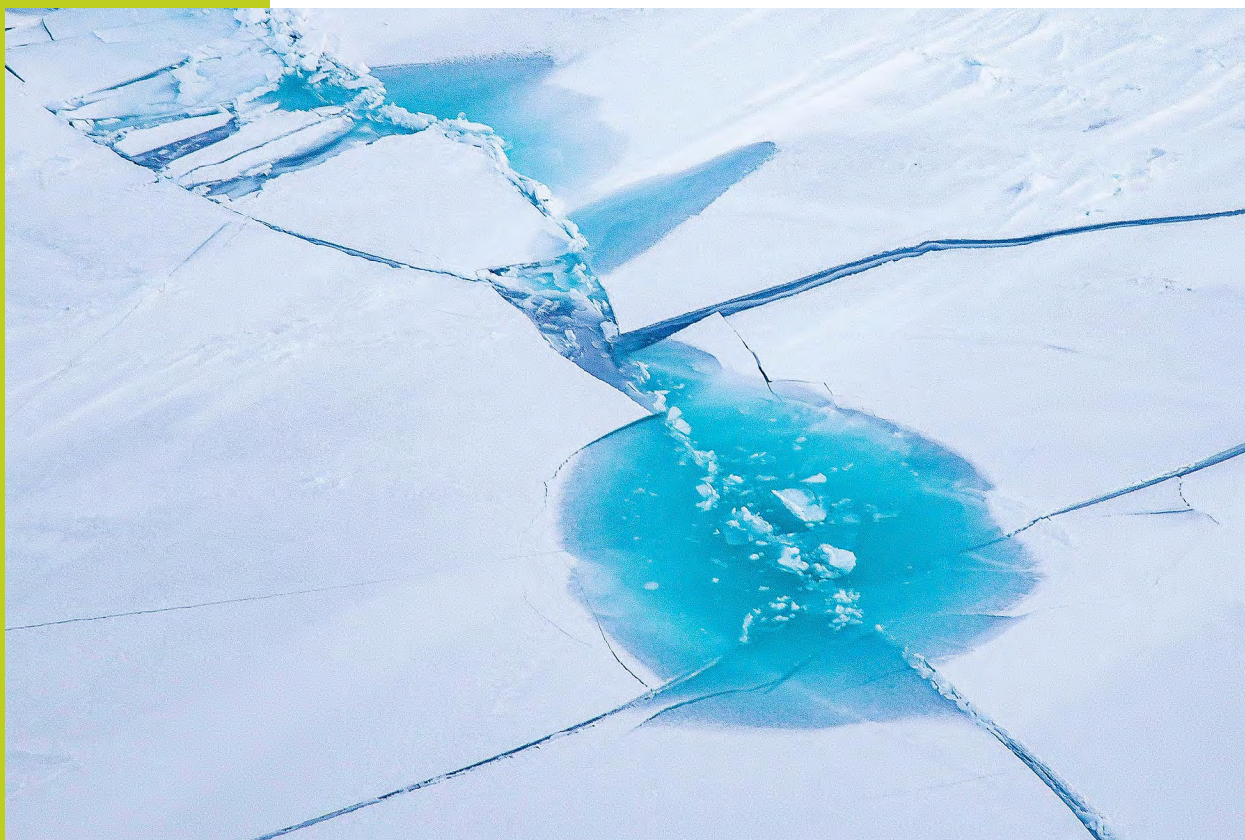


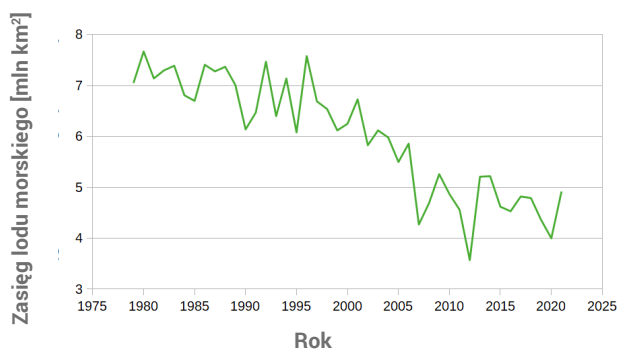
Ilustracja 8.4.3. Grzbiety na powierzchni lodu morskiego.

Zdjęcie: Jeremy Harbeck, NASA.

Ze względu na naturalny „cykl życia” lodu morskiego, jeśli chcemy sprawdzić, jak jego ilość zmienia się w dłuższym okresie, musimy wybrać jedną konwencję i się jej trzymać. 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 pochodzących z obserwacji naziemnych i lotniczych prześledzono też stan lodu arktycznego od połowy XIX wieku (Walsh i in., 2017). Stwierdzono, że jego zasięg w półroczach letnich zaczął wyraźnie spadać pod koniec XX wieku (ilustracja 8.4.5.). W latach 1979–2018 minimalny zasięg lodu w okolicach bieguna północnego zmniejszał się średnio w tempie $12,8 \pm 2,3\%$ na dekadę (Pörtner i in., 2019).





Ilustracja 8.4.5. Zmiany zasięgu lodu morskiego w Arktyce na podstawie pomiarów satelitarnych.

Dane: 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, ciepłe lato potrafi więc 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. W latach 1979–2014 obserwowano lekki przyrost tej pokrywy, następnie jednak jej zasięg zaczął spadać aż do minimum w 2017 roku. W efekcie trend dla całego okresu obserwacji nie jest istotny statystycznie (Fox-Kemper i in., 2021). Globalny średni zasięg i objętość lodu morskiego spadają.

Jak może pamiętasz z podrozdziału 1.3., 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, 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 jezior (ilustracje 8.4.6. i 8.4.7.). 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).



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Zanik lodu w Arktyce:
bezprecedensowe zjawisko
czy naturalna zmienność?

Roller coaster zmiany
klimatu przyspiesza?



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYKÓW



Jeśli chcesz zobaczyć, jak zmienia się wiek lodu arktycznego, wyszukaj animację **Weekly Arctic Sea Ice Age** na stronie
<https://svs.gsfc.nasa.gov/>



Ilustracja 8.4.6. 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 w dłuższej perspektywie 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 ?

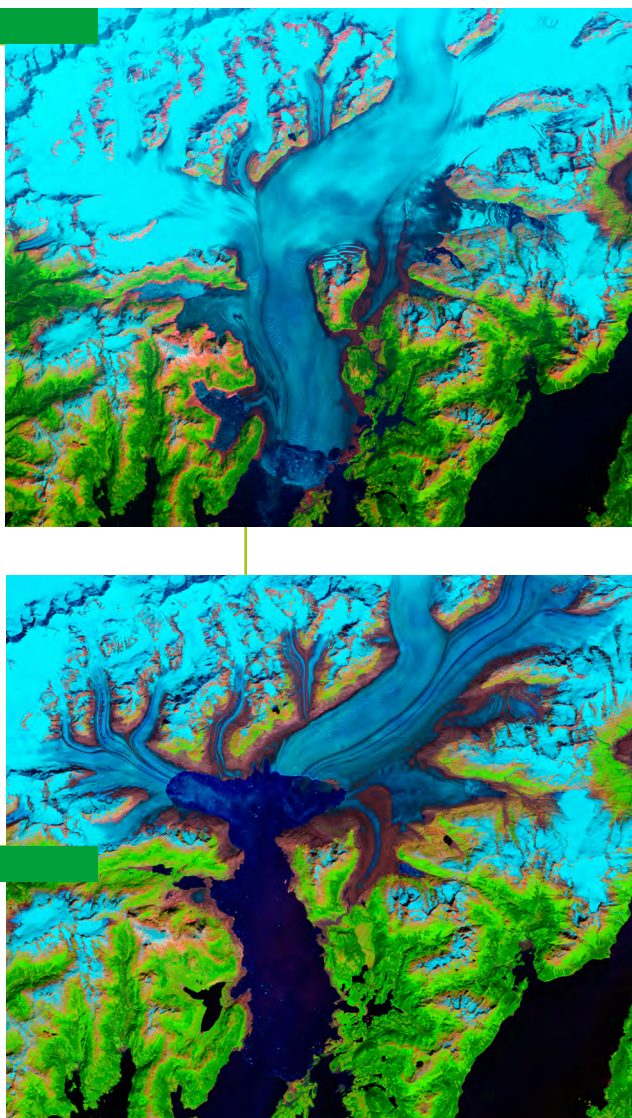
Lodowce górskie stanowią w wielu regionach świata gwarancję stabilnego dostępu do wody. Wytopiająca się z nich latem woda zasila rzeki, dzięki czemu ich stan zależy nie tylko od bieżących opadów. W latach suchych odbiorcy korzystają z pokładów śniegu i lodu zbierającego się także w poprzednich sezonach. Całkowite stopnienie lodowców w jakimś rejonie oznacza, że przepływ w rzekach w większym stopniu zależy od bieżących opadów.

28 lipca 1986

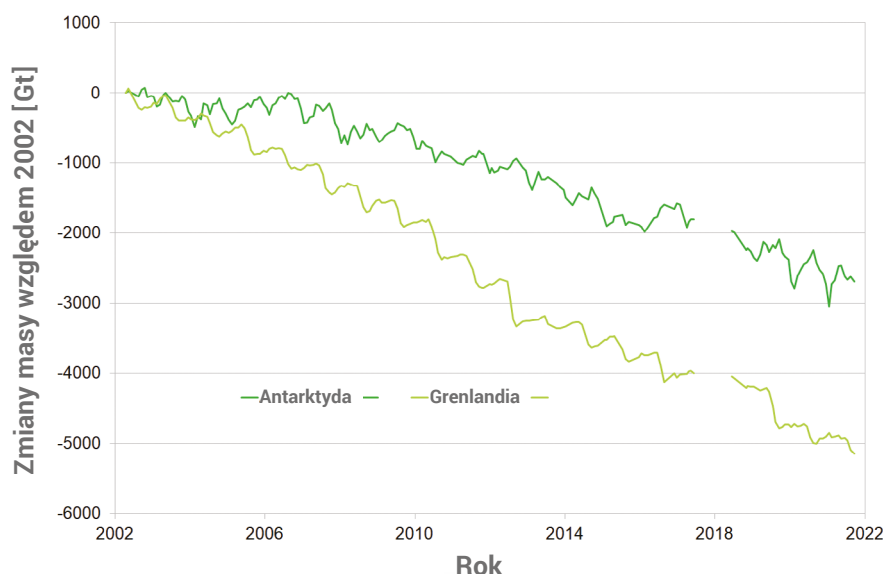
Ilustracja 8.4.7. Lodowiec Columbia na Alasce – sztucznie pokolorowane obrazy satelitarne, na których lód jest w kolorze jaskrawoniebieskim. Na górze zdjęcie z 28 lipca 1986 roku, na dole – z 2 lipca 2014 roku. W górnej części zdjęć widzimy wierzchnie części lodowca, spływające z gór (kolor pomarańczowy 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 granatowy), 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. Ze względu na swoją lokalizację Grenlandia jest jednak bardziej wrażliwa na wzrost temperatury i obecnie traci rocznie ok. 276 Gt lodu, podczas gdy Antarktyda ok. 152 Gt (NASA, 2021), (ilustracja 8.4.8.). W przypadku obu lądolodów zaobserwowano wzrost tempa topnienia w porównaniu z końcem XX wieku (Fox-Kemper i in., 2021). W latach 2006–2019 lodowce w innych regionach świata traciły w sumie 240 ± 40 Gt lodu rocznie, czyli ok. 3% całkowitej masy lodowców z roku 2006 (Fox-Kemper i in., 2021).



Ilustracja 8.4.8. 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.

Ilustracja 8.4.9. 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.

CHYBA WIESZ, ŻE ?

Ujemne temperatury powietrza nad lądolodami nie powstrzymują ich 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.

Jak pisaliśmy już w podrozdziale 1.4., 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 (skręcania 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 powstrzymać, nawet przy zahamowaniu 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 szybszy niż w jakimkolwiek innym stuleciu w ciągu ostatnich trzech tysięcy lat. W latach 1901–1971 poziom morza rósł średnio w tempie ok. 1,3 mm/rok, w latach 1971–2006 – ok. 1,9 mm/rok, a w 2006–2018 już ok. 3,7 mm/rok (IPCC, 2021), (ilustracja 8.4.10.).



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Rozpad lądolodu Antarktydy Zachodniej nieunikniony

Antarktyda jak butelka – szybko się opróżnia po odkorkowaniu

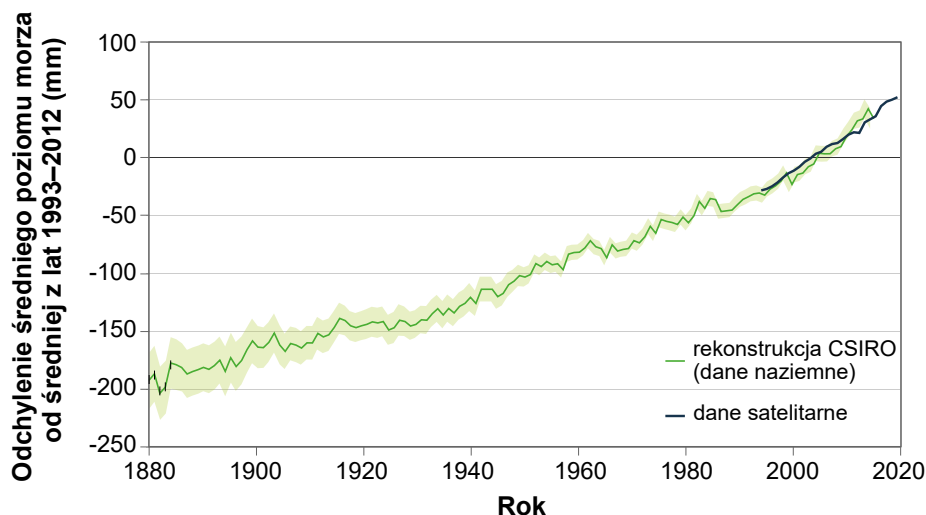


www.glacjoblogia.wordpress.com

Ostatni spokojny fragment Grenlandii już niestabilny

Ilustracja 8.4.10. 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: European Environment Agency.



CZY WIESZ, ŻE ?

Lokalny poziom morza i jego zmiany zależą nie tylko od objętości wody w oceanie. Znaczenie mają także: różnicowanie ziemskiego pola grawitacyjnego, jest silniejsze w pobliżu lądów pokrytych górami lub lądolodem, a słabsze w rejonach rowów oceanicznych, różnicowanie ciśnienia atmosferycznego, a także 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).

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 wkład zmienia się w czasie. Początkowo dominujące znaczenie miała rozszerzalność termiczna, obecnie – przede wszystkim ze względu na przyspieszenie topnienia Grenlandii – istotniejszy jest wzrost ilości wody w oceanie. Szacunkowy wkład we wzrost poziomu morza w latach 2006–2018 zestawiono w tabeli. Jej ostatnia pozycja 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 zbieranie się dużej ilości wody na lądzie w wyniku nasilonych opadów (np. w 2011 r. związane ze zjawiskiem La Niña opady w Australii spowodowały krótkotrwały spadek globalnego poziomu morza – Fasullo, 2013).

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Sekrety poziomu morza

Tysiące lat zmian poziomu morza

Spadek poziomu oceanów, czyli „gdzie się podzielała ta woda?”



Szacunkowy wkład poszczególnych zjawisk we wzrost poziomu morza w latach 2006–2018

ZJAWISKO	WKŁAD WE WZROST POZIOMU MORZA [MM/ROK]
Rozszerzalność termiczna wody	1,39 [0,74–2,05]
Topnienie Grenlandii	0,91 [0,79–1,02]
Topnienie Antarktydy	0,53 [0,40–0,66]
Topnienie lodowców w innych regionach	0,62 [0,57–0,68]
Spływ wody z lądów do morza / magazynowanie wody na lądach	0,60 [0,32–0,88]

Źródło: Fox-Kemper i in., 2021.

W latach 1901–2018 średni poziom morza wzrósł o 20 ± 5 cm. Przy założeniu szybkich cięć w emisji gazów cieplarnianych (scenariusze SSP1-1.9 i SSP1-2.6) do końca XXI wieku możemy spodziewać się wzrostu o 28–62 cm (względem okresu 1995–2014), a w przypadku utrzymania wysokich emisji (SSP5-8.5) – o 63–101 cm (IPCC, 2021). Należy się przy tym liczyć z faktem, że proces ten będzie trwał w kolejnych stuleciach oraz że w przypadku przekroczenia przez cofające się lodowce Antarktydy i Grenlandii punktów krytycznych może stać się nie do powstrzymania, nawet przy zahamowaniu ocieplania się klimatu i doprowadzić nawet 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 – zwłaszcza wypełniającej tereny portów i delty rzek.

ZMIANY W PRĄDACH OCEANICZNYCH

Jednym ze sposobów rozpraszania 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 zawiera soli. 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 oraz w okolicach Półwyspu Antarktycznego i 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 wody słodkiej, która ze względu na mniejszą gęstość ma tendencję do pozostawiania 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 obecnie mamy już 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 3–5°C ocieplenia względem czasów przedprzemysłowych (Steffen i in., 2018).

Układ prądów morskich i związana z nim temperatura oceanu mają istotny wpływ na pogodę w poszczególnych częściach globu, ponieważ decydują o sile i miejscach występowania takich zjawisk, jak: burze, silne opady czy susze. Ewentualne spowolnienie cyrkulacji atlantyckiej przyniosłoby Europie Zachodniej ochłodzenie i silniejsze sztormy.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

**Wzrost poziomu morza –
prognozy coraz bardziej
pesymistyczne**



NAUKA O KLIMACIE
DLA SCEPTYCZNYCH

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 lądów 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 powoduje między innymi naruszenie stabilności gruntu oraz emisję dwutlenku węgla i metanu ze szczątków organicznych, które w dodatnich temperaturach zaczynają podlegać rozkładowi.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

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”?



W bieżącym stuleciu spodziewany jest wielkopowierzchniowy zanik wieloletniej zmarzliny. Jeśli uda nam się szybko ograniczyć emisję gazów cieplarnianych, topnienie obejmie 2–66% jej powierzchni, w przeciwnym razie – nawet 30–99%. W rezultacie do atmosfery uwolnione zostaną dziesiątki lub setki miliardów ton węgla (do 240GtC). Mimo że masowy udział metanu w tych emisjach pozostanie nieduży, gaz ten będzie jednak odpowiadać za 40–70% wkładu topnienia zmarzliny w dalsze ocieplanie się klimatu (Pörtner i in., 2019).

Chociaż topnienie zmarzliny stanie się niemożliwe do zatrzymania prawdopodobnie dopiero wtedy, gdy średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrośnie o ponad 5°C względem epoki przedprzemysłowej (Steffen i in., 2018), to nawet przy odpowiednio mniejszym ociepleniu dodatkowa emisja gazów cieplarnianych z tego źródła może znacząco wpłynąć na klimat.





KLIMATYCZNE
ABC

ANDRZEJ MIKULSKI

ORCID 0000-0002-8631-1875, Uniwersytet Warszawski

BARBARA PIETRZAK

ORCID 0000-0001-5446-6277, Uniwersytet Warszawski

9. Jak zmiana klimatu wpływa na przyrodę ożywioną?

Postępująca zmiana klimatu oddziałuje 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 lokalnego **wymarcia (ekstynkcji)** jednego gatunku może być przebudowa całego ekosystemu, a zmiany w funkcjonowaniu ekosystemów oddziałują zwrótnie na klimat. Działalność człowieka wywiera bezpośrednią, różnie ukierunkowaną presję na ekosystemy naturalne i ich elementy, w tym na współtworzące je gatunki.

LOKALNA EKSTYNKCJA – zanik populacji danego gatunku (podgatunku, rodzaju itp.) na określonym obszarze jego występowania, przy jednoczesnym utrzymywaniu się jego populacji na innych obszarach (w przeciwieństwie do ekstynkcji globalnej – całkowitego zniknięcia gatunku z powierzchni Ziemi).

DEFINICJA

Z tego rozdziału dowiesz się, jak zmiana klimatu wpływa na dostępność wody dla organizmów żywych i w jaki sposób zatrzymują one wodę w ekosystemie, umożliwiając jej późniejsze wykorzystanie przez inne organizmy. Zrozumiesz, jak zdegradowane przez suszę ekosystemy wpływają zwrótnie na klimat. W kolejnej części poznasz bezpośrednie konsekwencje rosnących temperatur oraz reakcje na te zmiany poszczególnych osobników i ich zespołów. Przekonasz się, że organizmy nie zawsze mogą przenieść się w bardziej dogodne miejsce lub nie mają czasu na przystosowanie się do zmienionych warunków. Wtedy właśnie dochodzi do lokalnego wyginięcia wszystkich osobników określonego gatunku, a więc do lokalnej ekstynkcji. W części poświęconej różnorodności ekologicznej opisujemy mechanizmy prowadzące do przebudowy całych ekosystemów w wyniku pozornie niewielkich zmian, na przykład lokalnej ekstynkcji jednego z setek tworzących ten ekosystem gatunków. W części dotyczącej bezpośrednich relacji człowieka z resztą biosfery piszemy o tym, jak nasza cywilizacja na różne sposoby prowadzi do jej zubożenia. Przedstawiamy dane wskazujące przyczyny i skalę zachodzących w biosferze zmian. Wyjaśniamy, dlaczego różnorodność biologiczna jest kluczowa dla funkcjonowania człowieka i jego gospodarki. Rozdział kończymy powrotem do problemu sprzężeń zwrotnych i omawiamy kolejny przykład wpływu, jaki zmiany w biosferze mogą mieć na klimat.

ANDRZEJ MIKULSKIORCID 0000-0002-8631-1875
Uniwersytet Warszawski**BARBARA PIETRZAK**ORCID 0000-0001-5446-6277
Uniwersytet Warszawski

9.1. Dostępność wody

Wraz ze zmianą klimatu maleje dostępność wody słodkiej dla organizmów żywych, a to one głównie zatrzymują wodę w krajobrazie i umożliwiają jej późniejsze wykorzystanie. Następująca wskutek suszy degradacja całych ekosystemów zwiększa zatem prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnej suszy i wpływa zwrótnie na klimat.

ZMIANA KLIMATU POWODUJE 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 w dużym stopniu od temperatury wody na styku faz woda–powietrze (im wyższa, tym jest silniejsze), a wzrasta ona gwałtownie w przypadku nawet krótkotrwałych upałów. Zjawiskiem najsilniej generującym suszę jest więc występowanie długich okresów bezdeszczowych z wysoką temperaturą.

DOSTĘPNOŚĆ WODY NA LĄDACH ZALEŻY ZNACZĄCO OD TEMPA JEJ PAROWANIA I ODPŁYWU 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 wszystkie lądy pokrywały szczelnie wybetonowane miasta, woda byłaby dostępna dla organizmów (w tym człowieka) jedynie w trakcie opadów lub tuż po nich – szybko spłynęłaby do oceanów, powodując po drodze krótkotrwałą powódź. Obecność wody na lądach poza okresami opadów zapewnia **retencja**, czyli zjawisko zatrzymywania wody opadowej w krajobrazie.

DEFINICJA

RETENCJA WODNA – zdolność do zatrzymywania i gromadzenia wody przez ożywione i nieożywione elementy środowiska, takie jak: rośliny, gleba, zbiorniki wodne powierzchniowe i podziemne oraz śnieg i lód.

EFEKTYWNĄ RETENCJĘ ZAPEWNIĄJĄ BOGATE ZBIOROWISKA ROŚLINNE

Istotę retencji najlepiej zrozumieć, stojąc pod drzewem w czasie deszczu. Na początku 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 zatrzymująca wodę, dzięki czemu po deszczu zasila w nią swoje otoczenie. 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

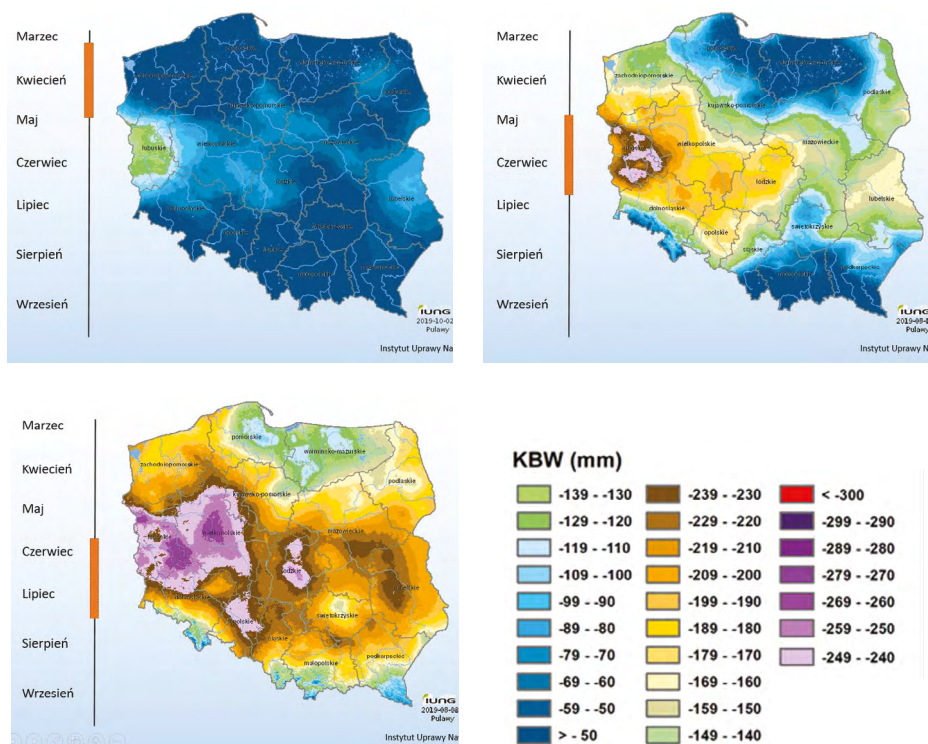
Retencyjność środowiska w Polsce nie ulega poprawie – przeciwnie, obserwujemy jej stopniowe pogorszenie (ilustracja 9.1.1.). Dla bilansu wodnego kraju szczególnie ważne jest zatrzymywanie wody w górach, gdzie spada znaczna część wody deszczowej. Retencji nie sprzyja intensyfikacja wycinki i degradacja górskich lasów, szczególnie starodrzewów (ilustracja 9.1.2.). Woda opadowa, która nie zostanie zatrzymana przez las, spływa do uregulowanych strumieni i jest szybko wyprowadzana na niziny, a potem do morza. Pogarszanie się retencji w obliczu coraz bardziej niekorzystnego – jak się spodziewamy – bilansu wodnego stanowi poważne zagrożenie dla funkcjonowania ekosystemów i gospodarki człowieka.

CZY WIESZ, ŻE ?

Jeden kilogram torfu może zatrzymać (retencionować) do 12 kg wody.

Ilustracja 9.1.1. Klimatyczny bilans wodny 2019 roku. Wartości ujemne oznaczają parowanie przewyższające opad.

Źródło: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach.

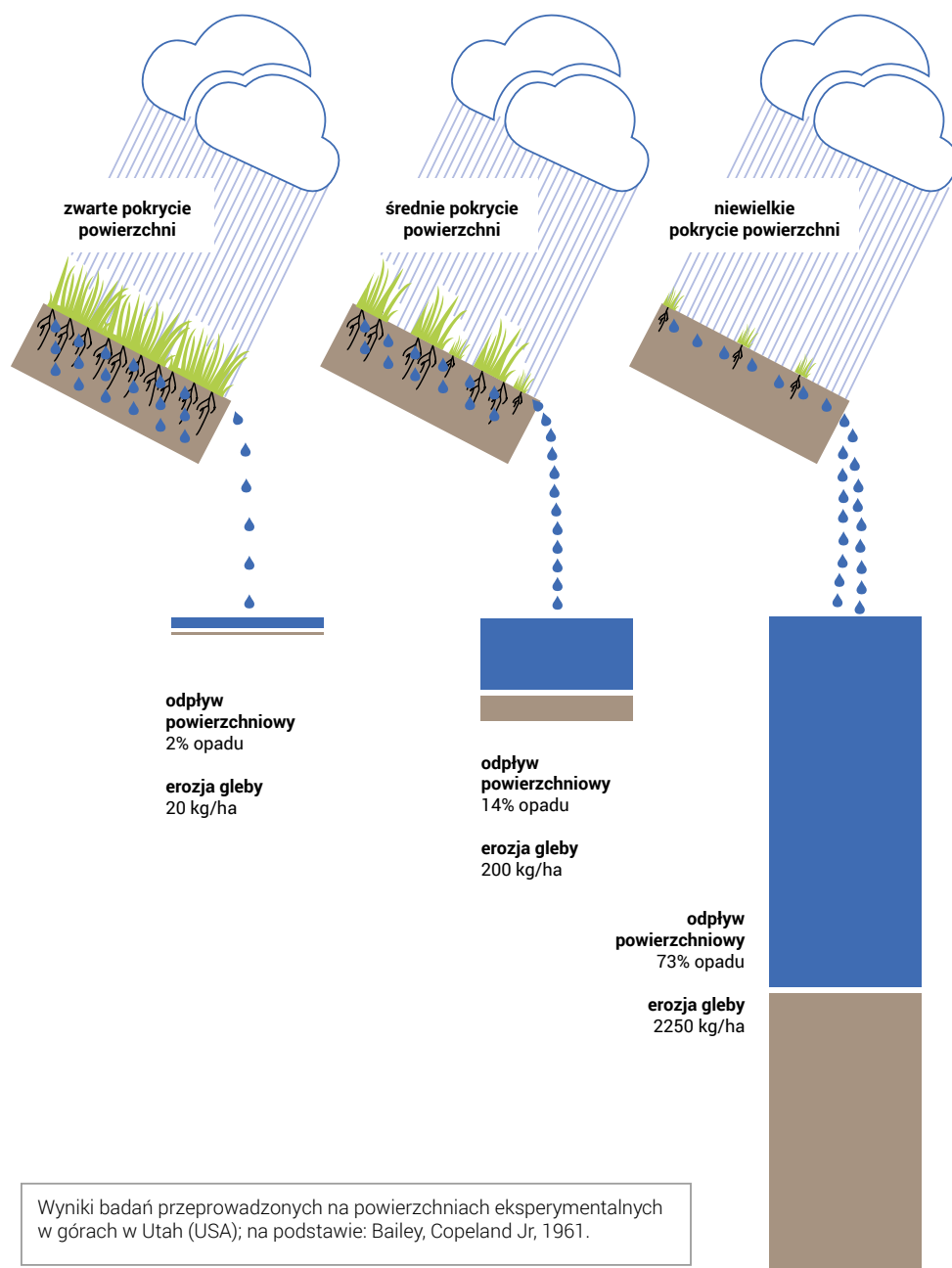


PYTANIA DO REFLEKSJI

Przeanalizuj te wykresy i zastanów się, jaki wpływ na rozwój wiosennej suszy może mieć ograniczenie zasięgu i grubości pokrywy śnieżnej w górach.

W których górach (Karpatach czy Sudetach) miałyby to prawdopodobnie większe znaczenie w 2019 roku?

Ilustracja 9.1.2. Zależność między pokryciem powierzchni roślinnością a odpływem powierzchniowym.



Dla zainteresowanych:

Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce

Kundzewicz, Z.W., Hov, Ø., Okruszko, T. (red.), 2017.

Publikacja dostępna online.

Za pogorszenie retencyjności odpowiadają także tzw. prace utrzymaniowe na ciekach, których jednym z głównych celów jest udrażnianie rzek i przyspieszanie odpływu wody z krajobrazu. Działania takie wynikają w dużej mierze z anachronicznego prawa i niedostatecznej wiedzy lokalnych społeczności na temat związków między ograniczaniem wiosennych podtopień łąk i pól a późniejszą suszą.

Udrażnianie cieków polega zazwyczaj na usunięciu osadów dennych i wyrównaniu koryta rzecznej. 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 bezpośrednio kształtuje strukturę ekosystemu. Od niej zależy charakter szaty roślinnej, a ta istotnie wpływa 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 w skali zarówno globalnej, jak i lokalnej.

RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA – inaczej **BIORÓŻNORODNOŚĆ** – to zróżnicowanie organizmów żyjących we wszystkich ekosystemach, na przykład lądowych, słodkowodnych i morskich, oraz zróżnicowanie całych układów ekologicznych, których są one częścią; obejmuje zróżnicowanie w obrębie gatunku, międzygatunkowe i ekosystemowe.

DEFINICJA

CZY WIESZ, ŻE ?

Podatność świerków na uszkodzenia powodowane przez kornika zależy istotnie od wilgotności środowiska. Susza jest więc jedną z przyczyn częstych i dużych wzrostów liczebności korników w Puszczy Białowieskiej.

ZE ZJAWISKIEM SUSZY ZWIĄZANE JEST PROSTE I SZYBKIE SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Susza powoduje degradację ekosystemów i poprzez to zmniejsza zdolności retencyjne krajobrazu, co z kolei zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnej suszy. Degradacja roślinności upośledza jej bezpośrednią zdolność do zatrzymywania wody i likwiduje zacienienie ograniczające parowanie z gruntu. Woda opadowa znacznie gorzej wnika w suche podłoże, co zwiększa intensywność spływu powierzchniowego i szybkiego odpływu do rzeki. Susza powoduje degradację gleb i torfowisk, zmniejszając ich zdolność retencji, powodując tym samym uwalnianie olbrzymich ilości dwutlenku węgla do atmosfery (w glebach jest go wciąż więcej niż w atmosferze – piszemy o tym w rozdziale 2. poświęconym krążeniu węgla w przyrodzie). Źródłem ogromnych skokowych emisji dwutlenku węgla są również pożary, będące jeszcze jedną konsekwencją suszy.

ANDRZEJ MIKULSKIORCID 0000-0002-8631-1875
Uniwersytet Warszawski**BARBARA PIETRZAK**ORCID 0000-0001-5446-6277
Uniwersytet Warszawski

9.2. Wpływ zmiany klimatu na osobniki, populacje, gatunki

Rosnące temperatury oddziałują na organizmy bezpośrednio i pośrednio. Zmiany obecnie zachodzą szybko, a wiele organizmów nie może przenieść się w bardziej dogodne miejsce ani nie ma czasu na przystosowanie się do zmienionych warunków. Konsekwencją tych zjawisk są lokalne ekstynkcje.

CZY WIESZ, ŻE ?

Wskutek zmiany klimatu sosna zwyczajna, świerk pospolity, modrzew europejski oraz brzoza brodawkowata będą występować zdecydowanie rzadziej na obszarze Polski.

ZMIANA KLIMATU POWODUJE PRZESUWANIE SIĘ ZASIĘGÓW GATUNKÓW

Każdy organizm na Ziemi ma 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. Zmiana klimatu oznacza *de facto* przesunięcia obszarów, na których można spotkać konkretny zestaw organizmów, w stronę biegunów lub wyżej, w ekosystemach górskich. Prowadzi to do przesunięcia się w przestrzeni zasięgu gatunków i ich zespołów – zmiany takie obserwujemy już teraz.

DEFINICJA

NISZA EKOLOGICZNA – wielowymiarowa przestrzeń zdefiniowana przez zakresy wartości parametrów środowiskowych (np. temperatury, ilości docierającego światła, dostępnego pokarmu lub budulca, zagęszczenia drapieżników lub konkurentów); nisza ekologiczna wyznacza warunki umożliwiające przeżycie osobnika (nisza potencjalna) lub opisuje warunki, jakich doświadcza on w trakcie życia (nisza realizowana).

Dla zainteresowanych:

www.naukawpolsce.pl

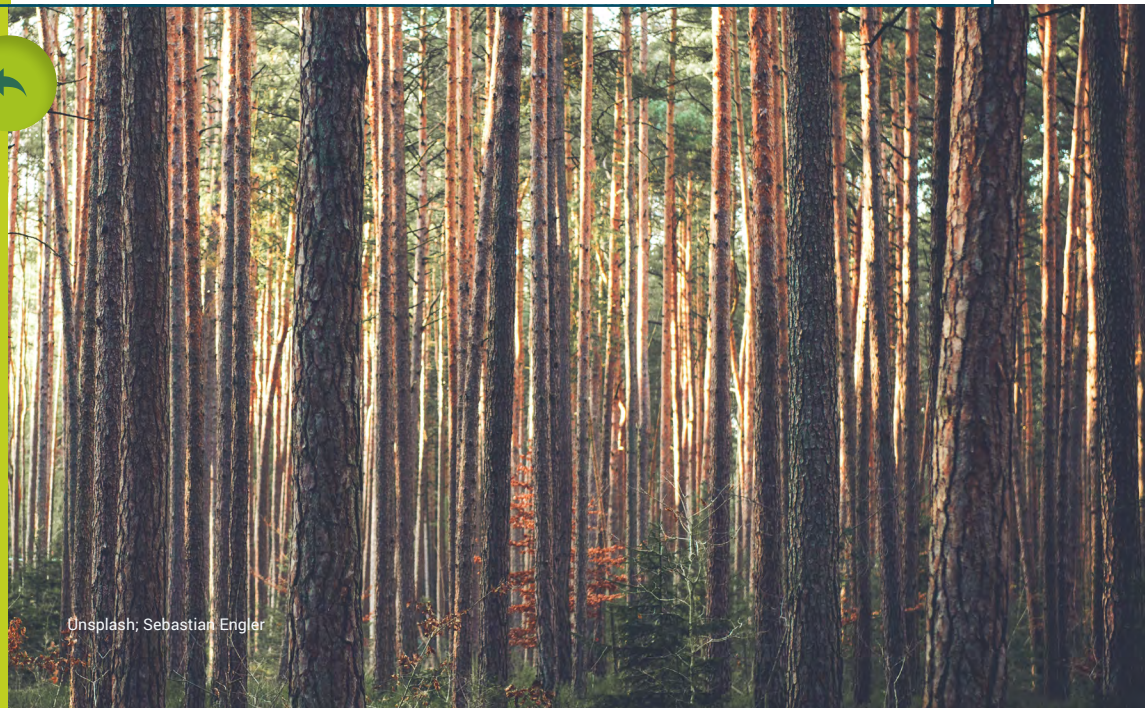
Ocieplenie klimatu oznacza zmiany dla gospodarki leśnej

Naukowcy z PAN prognozują: za kilkadziesiąt lat z polskich lasów może zniknąć 75% gatunków drzew

oraz

www.pap.pl

Pomidor na Giewoncie. Coraz więcej roślin zdobywa szczyty gór



Unsplash; Sebastian Engler

TEMPO ZMIAN UTRUDNIA ADAPTACJĘ SYSTEMÓW BIOLOGICZNYCH

Każda populacja ma w pewnym zakresie potencjał przystosowania się 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. Zbyt szybkie zmiany warunków środowiskowych mogą pociągać za sobą masową i długotrwałą degenerację ekosystemów wraz z ekstynkcją tworzących je populacji. Możliwość przesuwania zasięgów ku biegunom jest ograniczona także m.in. przez odmienną długość dnia i nocy na różnych szerokościach geograficznych. Część populacji nie jest też w stanie przenieść się na inne obszary, bo niezbędne warunki nie występują w zasięgu możliwej dla nich migracji. Tak dzieje się na przykład w przypadku ekosystemów raf koralowych, wrażliwych na podwyższenie temperatury i obniżenie pH.

ZMIANA KLIMATU WPŁYWA NA POPULACJE TAKŻE POŚREDNIO

Temperatura jest czynnikiem wpływającym na aktywność życiową i wiele cech organizmów. U licznych gatunków gadów i ryb to temperatura inkubacji jaj decyduje o płci nowo narodzonych osobników. Ocieplenie może więc zmienić naturalne proporcje między samcami i samicami, zaburzając funkcjonowanie populacji.

Jak wiesz z podrozdziału 2.3., szybkie zakwaszanie oceanów wiąże się ze spadkiem dostępności jonów wodorowęglanowych, niezbędnych do życia wszelkich organizmów wykorzystujących węglan wapnia do budowy zewnętrznych szkieletów, począwszy od mikroskopijnych planktonowych otwornic po kilkusetkilogramowe małże przydacznie (*Tridacna*) i koral rafotwórcze. Może to doprowadzić do wyginięcia wielu takich organizmów.

Podnoszenie się poziomu wody w oceanach towarzyszące ociepleniu klimatu powoduje destabilizację i postępującą degradację ekosystemów związanych z brzegiem morskim. Prowadzi na przykład do zniszczenia (zalanía) przymorskich torfowisk i lasów namorzynowych oraz ekstynkcji wielu bytujących tam populacji.

ZMIANA KLIMATU POCIĄGA ZA SOBĄ EKSTYNKCJĘ GATUNKÓW

Z powodu szybkości zmiany klimatu wiele populacji nie jest w stanie przystosować się do nowych warunków ani przemieścić do zastępczych siedlisk. Jest to jedna z przyczyn utraty bioróżnorodności w skali zarówno globalnej, jak i lokalnej. Często trudno stwierdzić, czy gatunek jest zagrożony, czy zanikł w wyniku zmiany klimatu, lub też czy doprowadziły do tego inne skutki działań człowieka. Niemniej, bez wątpienia klimatyczny komponent ekstynkcji gatunków jest coraz częściej zauważalny i opisywany w literaturze naukowej.



Dla zainteresowanych:
ziemianarozdrozu.pl

**Ocieplenie klimatu zabija
Wielką Rafę Koralową**

CZY WIESZ, ŻE ?

Szczurzynek koralowy (*Melomys rubicola*) to pierwszy ssak, o którym doniesiono, że wymarł bezpośrednio w wyniku obecnej zmiany klimatu. Spotykany był tylko na wysepce Bramble Cay między Australią a Nową Gwineą. Jego siedlisko zostało zniszczone przez podnoszący się poziom mórz.



ANDRZEJ MIKULSKIORCID 0000-0002-8631-1875
Uniwersytet Warszawski**BARBARA PIETRZAK**ORCID 0000-0001-5446-6277
Uniwersytet Warszawski

9.3. Różnorodność biologiczna a funkcjonowanie ekosystemów

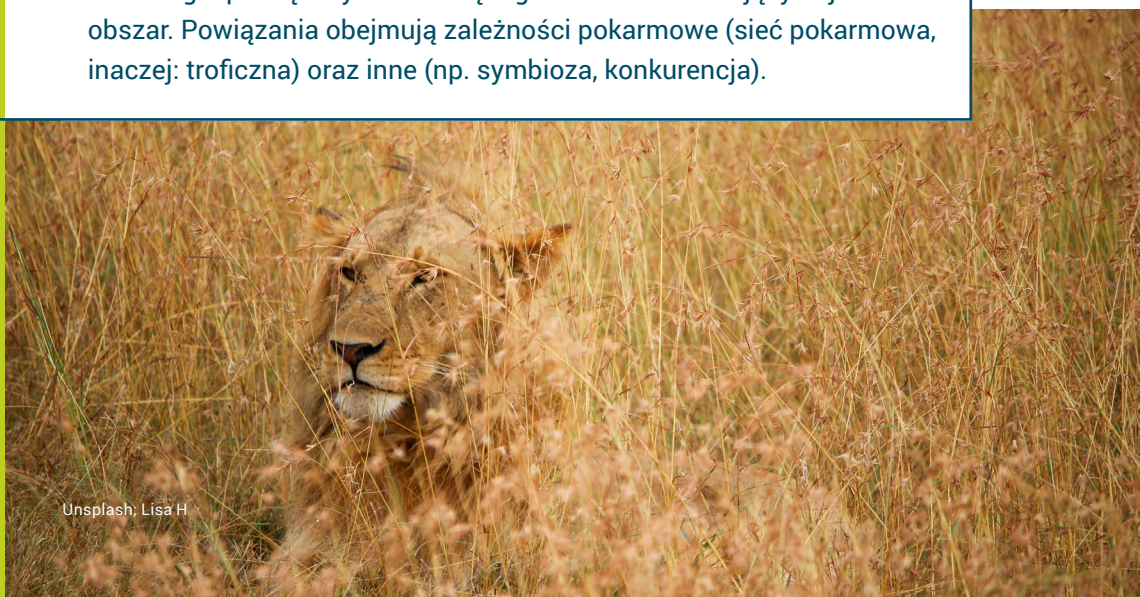
Organizmy żywe powiązane są ze sobą siecią różnych zależności. Dlatego nawet pozornie niewielkie zmiany – na przykład lokalna ekstynkcja tylko jednego z setek gatunków – mogą prowadzić do przebudowy całych ekosystemów.

RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNĄ MOŻNA ANALIZOWAĆ NA RÓŻNYCH POZIOMACH ORGANIZACJI ŻYCIA

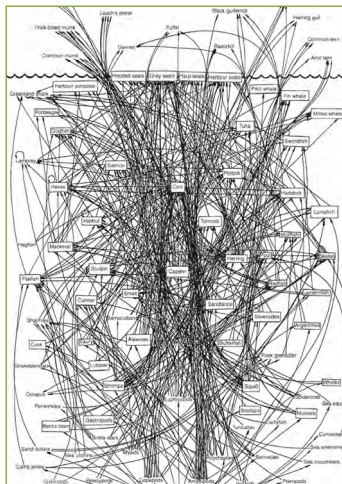
Różnorodność biologiczna potocznie jest utożsamiana z **różnorodnością gatunkową**, czyli liczbą gatunków występujących na jakimś terenie, od drobnego fragmentu siedliska do całej biosfery. Termin ten ma jednak dużo szersze znaczenie. Różnorodność może dotyczyć **zróżnicowania genetycznego populacji** i odgrywać bardzo ważną rolę w ich trwałości – populacje o dużym zróżnicowaniu genetycznym są zazwyczaj bardziej odporne na zaburzenia i mogą przetrwać dłużej, skuteczniej adaptując się do zmian środowiska. Zróżnicowanie biologiczne możemy też analizować w odniesieniu do większych zespołów organizmów, takich jak **biocenozy**. Wówczas szczególnie ważna jest **różnorodność funkcjonalna**, definiowana przez zależności pomiędzy organizmami tworzącymi biocenozę (np. pewne owady pełnią funkcje zapylaczy, inne destruktorów, tzn. biorą udział w rozkładzie martwej materii organicznej, lub są pokarmem dla większych zwierząt). Zazwyczaj bardziej zróżnicowane gatunkowo biocenozy charakteryzują się większą różnorodnością funkcjonalną, mają większą produktywność i są bardziej odporne na zaburzenia.

DEFINICJA

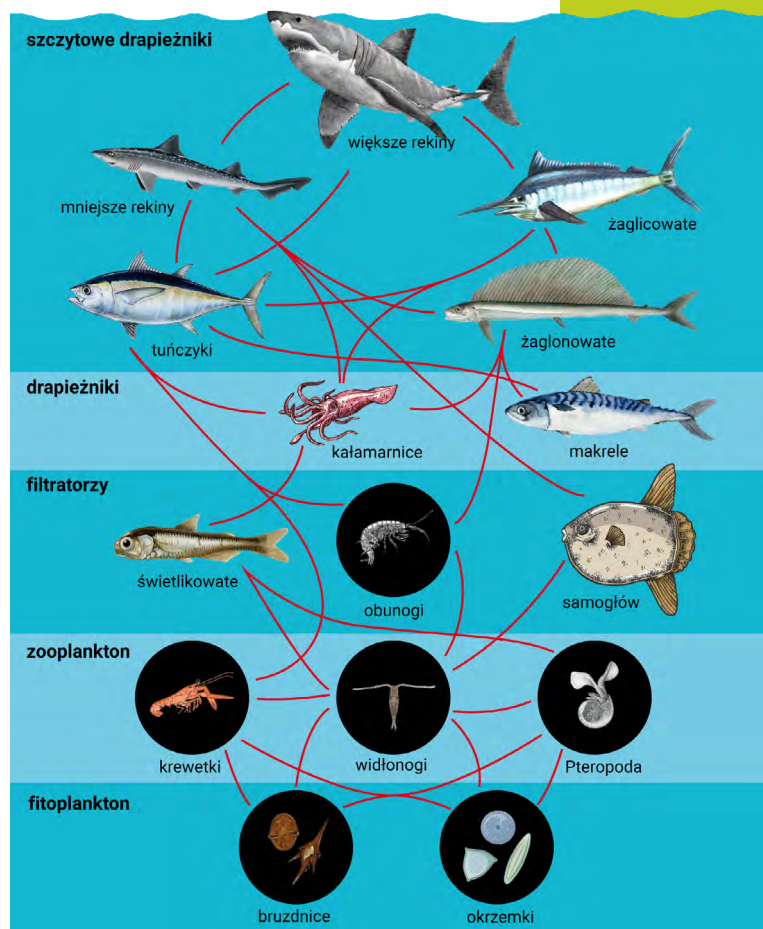
BIOCENOZA – biologiczna część ekosystemu. Wyróżnialny funkcjonalnie ogół powiązanych ze sobą organizmów zasiedlających jeden obszar. Powiązania obejmują zależności pokarmowe (sieć pokarmowa, inaczej: troficzna) oraz inne (np. symbioza, konkurencja).



a)



b)



Ilustracja 9.3.1. a. i b. Biocenoza oceaniczna. Obie ilustracje przedstawiają uproszczoną sieć powiązań pokarmowych między tworzącymi biocenozę organizmami.

Źródła: (a) Encyclopaedia Britannica, 2010; (b) IMMA/Prof. David Lavigne, NSERC.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Zapoznaj się z obiema ilustracjami 9.3.1. i wskaż organizmy pełniące w biocenozie oceanicznej funkcję: producentów, roślinożerców, planktonożerców, rybożerców. Czy potrafisz prześledzić istniejące między nimi sieci wzajemnych zależności?

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 jego prawidłowego funkcjonowania. Może to być zanik kilku gatunków pełniących w ekosystemie podobną funkcję (należących do tzw. gildii; niektóre funkcje pełnione przez owady zostały opisane powyżej) lub zanik jednego gatunku, niezbędnego dla przebiegu najważniejszych procesów w ekosystemie (ilustracje 9.3.2a. i b. oraz 9.3.3a. i b.). Gatunek taki nazywamy **gatunkiem zwornikowym** lub **kluczowym** (*keystone species*). Nazwa pochodzi od środkowego elementu łuku architektonicznego – jego usunięcie powoduje zawalenie się konstrukcji.

GATUNEK ZWORNIKOWY (KLUCZOWY) – ma nieproporcjonalnie do swej liczebności duży wpływ na zespół organizmów, w którym występuje. Utrzymując pod kontrolą liczebność populacji innych gatunków, które w innym przypadku zdominowałyby zespół, lub odgrywając zasadniczą rolę w przetrwaniu wielu innych gatunków, wspiera utrzymanie lokalnej różnorodności biologicznej. Gatunkami zwornikowymi są na przykład koralie rafowe, bóbr, wydra morska, wilk.

DEFINICJA

a)



BEZ WILKÓW

Jelenie z rozrastającej się, nieregulowanej 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 nieograniczana przez konkurentów populacja kojotów, które polują głównie na małe ssaki, w tym norniki i inne gryzonie. Zabrakło pożywienia dla lisów, borsuków, łasic i ptaków drapieżnych.

Dominuje roślinność nieleśna, której zdolność do retencji wody i do magazynowania węgla są znacznie mniejsze niż roślinności leśnej.

KONSEKWENCJE DLA KLIMATU

b)



Ilustracja 9.3.2a. i b. Reintrodukcja wilka jako szczytowego drapieżcy wywołała w Parku Yellowstone kaskadę zmian. W 1926 roku wybito tam ich ostatnią watahę; reintrodukowano je w 1995 roku.

Dane za: National Geographic, 2010; Ripple i Beschta, 2012; Beschta i Ripple, 2016. Ilustracja Fernando G. Baptista, Amanda Hobbs.

Z WILKAMI

Jeleni 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 brzozy strumieni, pomagając przywrócić naturalny przepływ wody. Ich gałęzie zacieniają wodę, a wśród gałęzi goszczą ptaki.

Obfitość pożywienia, przede wszystkim wierzb, umożliwiła wzrost populacji bobrów. Dzięki budowanym przez nie tamom powstają 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.

Dominują naturalne ekosystemy leśne, stanowiące znaczący magazyn węgla, które też na etapie intensywnego wzrostu szybko go magazynują. Jednocześnie taki krajobraz ma większą zdolność retencji wody, a drzewa – dzięki wyższej ewapotranspiracji niż rośliny zielne – przywracają więcej wody do lokalnego obiegu, schładzając jednocześnie mikroklimat.

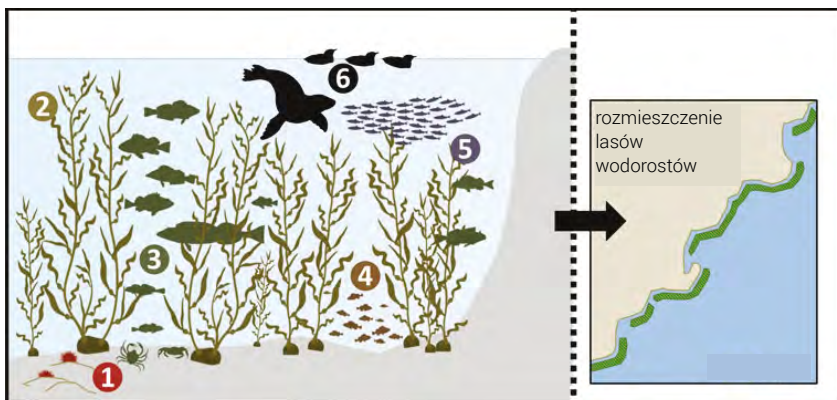
KONSEKWENCJE DLA KLIMATU

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.

PYTANIE DO REFLEKSJI

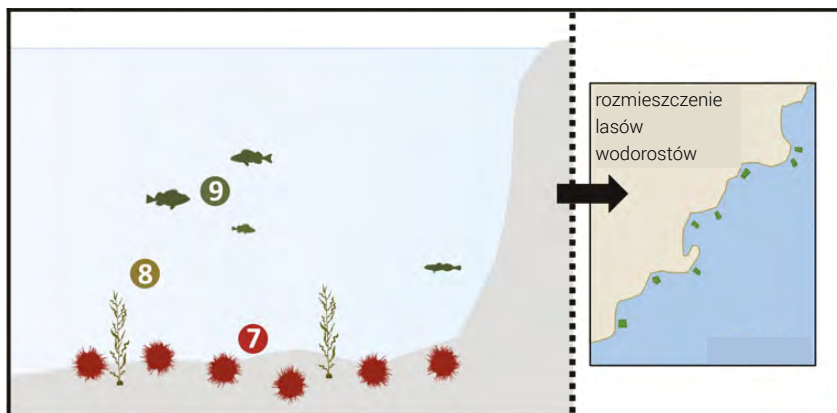
Porównaj stany tego ekosystemu przedstawione na obu ilustracjach 9.3.2. i wypisz gatunki, których liczebność zmieniła się po reintrodukcji wilka. Jaką rolę odgrywa w tym ekosystemie każdy z nich?

a) WYDRY OBECNE



(1) Wskutek drapieżnictwa wydr morskich populacja jeżowców składa się z małych osobników, pochowanych w szczelinach i na większych głębokościach. (2) Liczebność roślinożernych jeżowców kontrolowana jest przez wydry, dlatego lasy wodorostów rozrastają się bujnie. (3) Dzięki dostępności pokarmu roślinnego i przestrzeni do życia w postaci lasów wodorostów występuje tu 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 liczne są również inne duże drapieżniki (ssaki morskie i ptaki).

b) WYDRY NIEOBECNE, DOMINACJA JEŻOWCA



(7) Uwolnione spod presji drapieżców jeżowce osiągają duże rozmiary i rozprzestrzeniają się równomiernie. (8) Lasy wodorostów, wskutek ich wyżerania przez jeżowce, zanikają. (9) Innych konsumentów nie ma lub są nieliczni.

Nigdy do końca nie wiadomo, ile i jakie gatunki można usunąć z ekosystemu, 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.

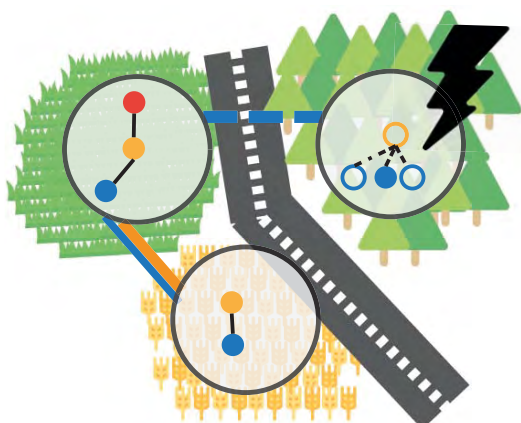
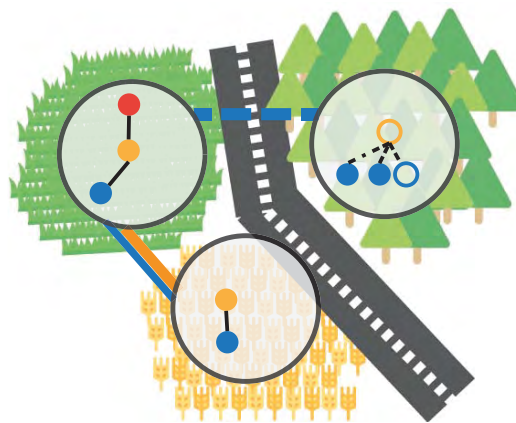
Hipoteza wypadających nitów (*rivet popping hypothesis*) znakomicie obrazuje problem podatności ekosystemów na ekstynkcję gatunków. Jej twórcy, Paul i Anne Ehrlich, powołują się na przykład samolotu, którego konstrukcja spojona jest nitami. Nie wszystkie są niezbędne, aby samolot w normalnych warunkach spełniał swoją funkcję. Usuwanie kolejnych nitów nie wywołuje widocznych skutków dopóty, dopóki pogarszające się warunki środowiskowe nie naruszają osłabionej konstrukcji lub dopóki nie usunie się zbyt wielu nitów, aby była ona stabilna nawet w warunkach optymalnych.

Ilustracja 9.3.3a. i b. Porównanie biocenozy zdominowanej przez wydry morskie i jeżowce. Zniknięcie z biocenozy wydry morskiej (jeszcze w XX wieku były one celem polowań ze względu na futra) prowadzi do dominacji jeżowców, co pociąga za sobą drastyczne zmiany.

Źródło: Szpak i in., 2013.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Przyjrzyj się uważnie obu ilustracjom 7.3.3., a następnie zastanów się i odpowiedz na pytanie, czy w omawianym ekosystemie gatunkiem zwornikowym jest dominujący producent (roślina), główny roślinożerca czy szczytowy drapieżnik?

a) **PODCZAS ZAKŁÓCENIA****ODBUDOWA PO ZAKŁÓCENIU**

Ekosystemy intensywnie zarządzane często są uproszczone troficznie. Bariery między nimi utrudniają przemieszczanie się osobników, szczególnie tych z wyższych poziomów troficznych. Ograniczanie występowania naturalnych zakłóceń, na przykład okresowych pożarów, zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia zakłóceń znacznie poważniejszych. Ubóstwo gatunkowe i bariery dla rozprzestrzeniania się spowalniają odbudowę biocenoz po zakłóceniach.

b) **PODCZAS ZAKŁÓCENIA****ODBUDOWA 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 się przemieszczać, odbudowując lokalne biocenozy po niewielkich zakłóceniach.

Ilustracja 9.3.4a. i b. Odbudowa po zakłóceniach (a) ekosystemów intensywnie zarządzanych i (b) ekosystemów, w których zachodzą naturalne procesy

Na podstawie: Perino i in., 2019.



zakłócenie



sieć troficzna



dyspersja



producenci



roślinożercy



szczytowi drapieżcy

PYTANIE DO REFLEKSJI

Wskutek zmiany klimatu występują częściej ekstremalne zjawiska pogodowe. Jak Twoim zdaniem, można – uwzględniając procesy przedstawione na obu ilustracjach 9.3.4. – zwiększyć odporność ekosystemów na takie zakłócenia?

9.4. Wpływ człowieka na różnorodność biologiczną

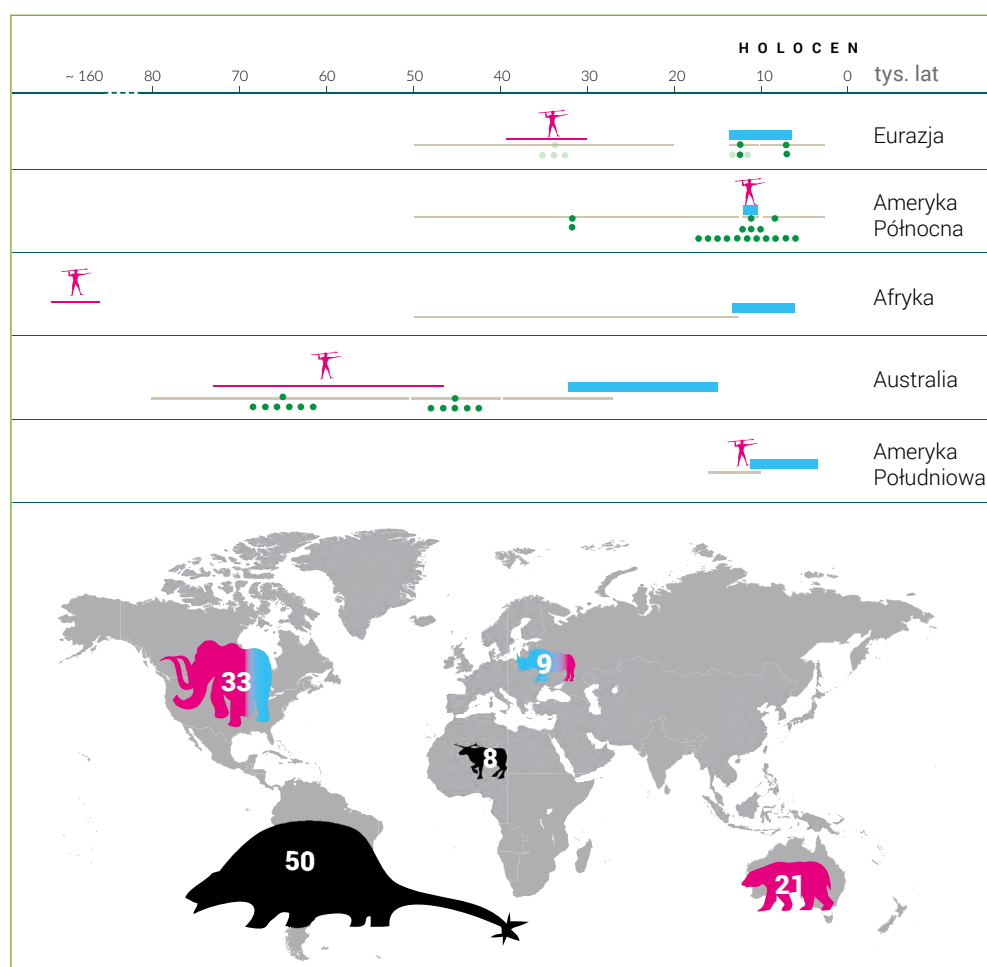
Od początku swojej ekspansji człowiek na różne sposoby powoduje zubożenie bioróżnorodności. Nawet gdy lokalnie różnorodność rośnie, zwykle okazuje się, że przybywa gatunków pospolitych, te rzadkie zaś ustępują.

RÓŻNORODNOŚĆ BIOLOGICZNA ZANIKA OBECNIE GŁÓWNIIE WSKUTEK DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA

Współczesne wymieranie gatunków rozpoczęło się na długo przed obecną zmianą klimatu. Człowiek zmniejsza bioróżnorodność od samego początku swojej ekspansji. W wielu miejscach, do których dotarł *Homo sapiens*, w miarę zasiedlania kolejnych fragmentów Ziemi, znikwały inne gatunki człowieka i lokalna, unikalna fauna (ilustracja 9.4.1.). Początkowo było to spowodowane intensywnym łowiectwem (w ten sposób wyginęły prawdopodobnie wielkie ssaki i ptaki, tzw. megafauna).

Ilustracja 9.4.1. Liczba wymarłych rodzajów wielkich ssaków na poszczególnych kontynentach.

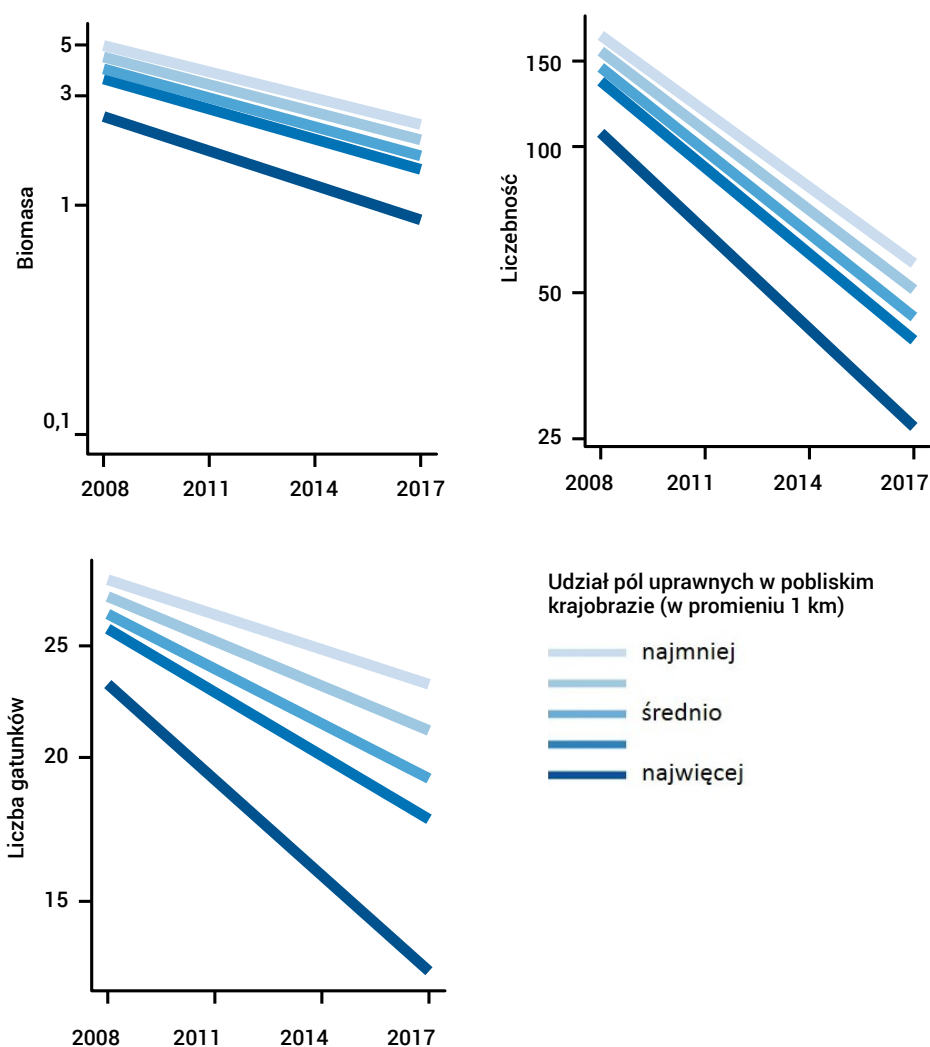
Dane za: Barnosky i in., 2004.



CZY WIESZ, ŻE ?

Według szacunków każdego dnia w wyniku wycinki wilgotnych lasów równikowych bezpowrotnie giną dziesiątki gatunków niepoznanych dotąd przez człowieka.

Potem istotnym czynnikiem powodującym ekstynkcję gatunków było niszczenie przez człowieka naturalnych siedlisk, począwszy od wypalania lasów w celu pozyskania terenów na uprawy, po rabunkową eksploatację zasobów 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 dewastujących przyrodę działań człowieka (ilustracje 9.4.2. i 9.4.3.), w niektórych samodzielnie przyczynia się do degradacji i utraty bioróżnorodności (podrozdział 9.2.). Zanik raf koralowych czy lasów namorzynowych pociąga za sobą spadek różnorodności organizmów wodnych, porównywalny na lądzie jedynie z tym spowodowanym niszczeniem lasów tropikalnych.

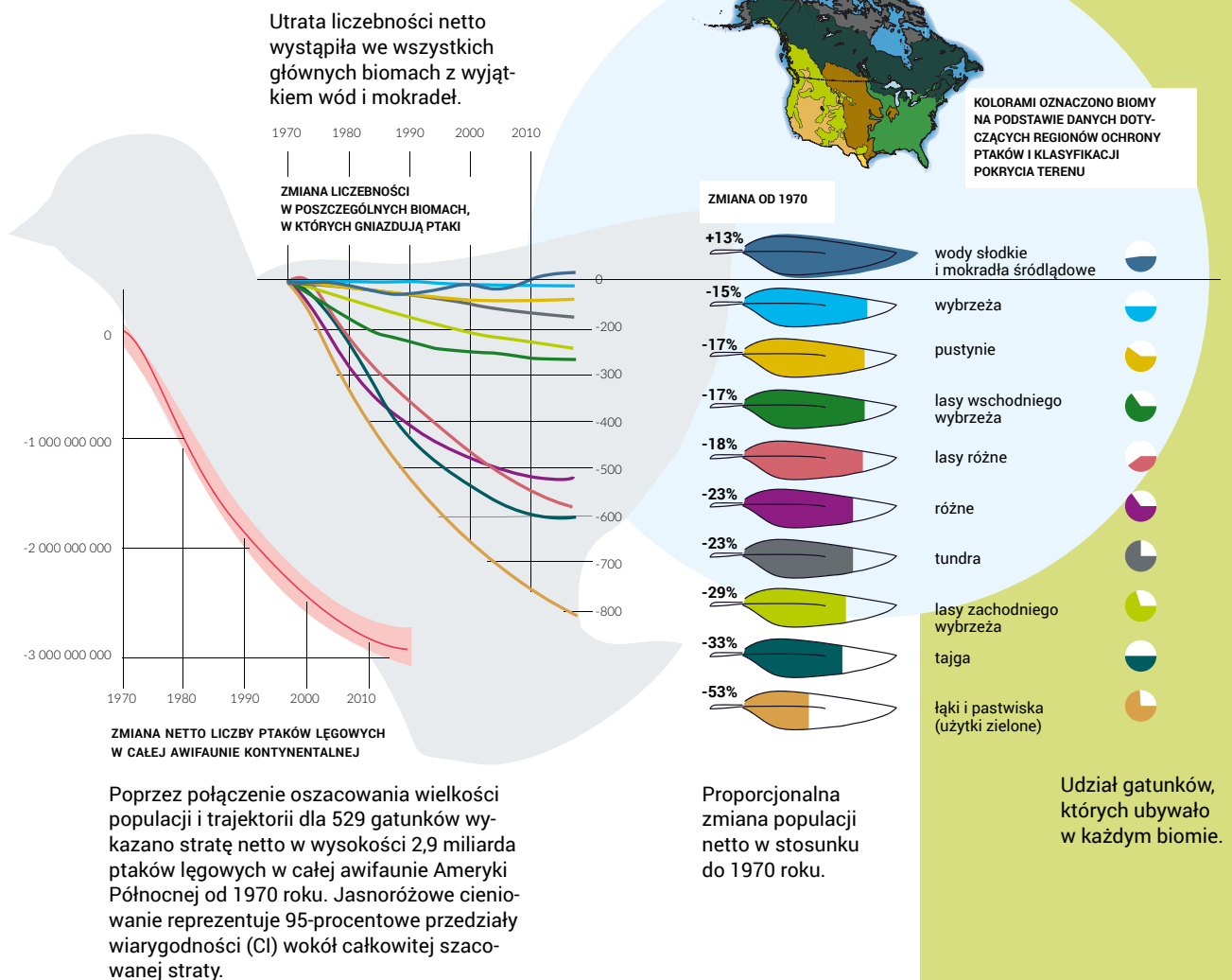


Ilustracja 9.4.2. Wpływ krajobrazu na zanik stawonogów na użytkach zielonych. Zmiany biomasy, liczebności populacji i liczby gatunków w badanym okresie dla wszystkich stawonogów łącznie. Badanie przeprowadzono w ramach projektu Biodiversity Exploratories w trzech regionach: południowo-zachodnich, środkowych i północno-wschodnich Niemczech.

Źródło: Seibold i in., 2019.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Korzystając z tych wykresów, odpowiedz na pytanie: Z jakich terenów ubyło najwięcej zwierząt – z tych otoczonych przez pola uprawne czy z tych od nich oddalonych?



Ilustracja 9.4.3. Zmiana netto liczebności populacji ptaków północnoamerykańskich.

Na podstawie: Rosenberg i in., 2019.

RÓŻNORODNOŚĆ GLOBALNA A RÓŻNORODNOŚĆ LOKALNA

Nie zawsze antropogeniczne zmiany siedlisk prowadzą do zmniejszenia lokalnej bioróżnorodności. Często w wyniku działalności człowieka naturalne biocenozy są zastępowane przez nowe, bogate gatunkowo, na przykład parki i ogrody. Znikają jednak przy okazji populacje gatunków wymagających specyficznych, naturalnych siedlisk, przestrzeń zaś zwykle zasiedlają gatunki pospolite, dobrze czujące się w przekształconym przez człowieka środowisku, na przykład 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 być podstawą decyzji pociągających za sobą niepowetowane szkody w rzeczywistej bioróżnorodności globalnej.** Uznawanie takich wskaźników za rozstrzygające może prowadzić do bezpowrotnego niszczenia rzadkich i bardzo cennych przyrodniczo ekosystemów, których immanentną cechą jest niska bioróżnorodność, takich jak górskie szczyty i jeziora czy ekosystemy pustynne (zobacz: materiał dodatkowy „Pomidor na Giewoncie” rekomendowany na s. 176).



Dla zainteresowanych:
www.naukadlaprzyrody.pl

Globalne zmiany w świecie zwierząt

oraz

wywiad z naukowcami
na temat wymierania owadów
<https://smoglab.pl/>

Ich zanikanie budzi we mnie grozę i przygnębienie

ANDRZEJ MIKULSKIORCID 0000-0002-8631-1875
Uniwersytet Warszawski**BARBARA PIETRZAK**ORCID 0000-0001-5446-6277
Uniwersytet Warszawski

9.5. Efekty bezpośrednie i sprzężenia zwrotne

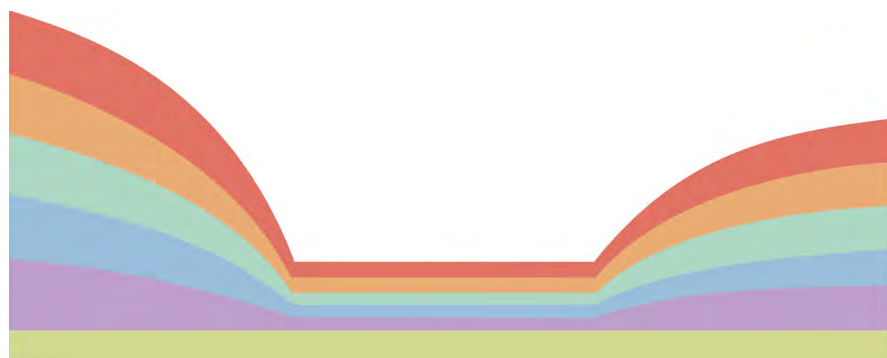
Nasza cywilizacja jest uzależniona od procesów zachodzących w ekosystemach naturalnych. Zaburzenia biosfery są bezpośrednią przyczyną strat gospodarczych, wpływają też na klimat.

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 zachodzenie procesów niezbędnych do życia na Ziemi – obiegów wody, węgla, azotu czy fosforu. Potrzebujemy tlenu, stałych dostaw świeżej wody, przestrzeni wolnej od nadmiaru dwutlenku węgla oraz wielu szkodliwych dla nas zanieczyszczeń i takich czynników fizycznych jak promieniowanie ultrafioletowe, zatrzymywane przez stratosferyczny ozon. Nie jesteśmy w stanie przetrwać bez roślinności produkującej tlen, magazynującej wodę w krajobrazie, oczyszczającej i nawilżającej miejskie powietrze ani bez rozbudowanych sieci pokarmowych (podrozdział 9.3.) ograniczających zagęszczenie zaburzających nasze funkcjonowanie pasożytów, a także szkodników upraw, wreszcie, wbrew intuicji wielu współczesnych ludzi, potrzebujemy naturalnej przyrody dla zdrowia i komfortu życia.

DEFINICJA

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, zapylenie upraw czy poprawianie samopoczucia i stanu zdrowia.



redukcja chorób zakaźnych
konkurencyjne wykluczenie patogenów
ekspozycja na korzystny mikrobiom
bioróżnorodność siedliska
ochrona immunologiczna
genetyka/dieta człowieka



Dzikie / Wiejskie

wzmacniające odporność siedlisko, różnorodne biologicznie i bogate w pożyteczny mikrobiom

Przemysłowe miejskie

siedlisko o niskiej różnorodności biologicznej, niewzmacniające odporności wskutek zmienionej ekspozycji mikrobiologicznej

Przywrócone dzikości miejskie (rewilded)

siedlisko miejskie zapewniające wzmacniającą odporność ekspozycję mikrobiologiczną dzięki odbudowanej bioróżnorodności

Przywracanie dzikiego mikrobiomu (*microbiome rewilding*) to postulat odtworzenia w siedlisku człowieka wysokiej różnorodności mikrobiologicznej i bliższych dzikim symbiotycznym, konkurencyjnym i drapieżniczym zależnościom mikroekologicznym. Siedliska człowieka charakteryzują się różnym poziomem różnorodności biologicznej i ekspozycji na mikroflorę, ochrony immunologicznej, procesów mikrobiologicznych i zapadalności na choroby zakaźne, także przy niezmienionej genetyce i diecie ludzi.

Ilustracja 9.5.1. Mało znaną usługą ekosystemową związaną z różnorodnością biologiczną jest pozytywny wpływ symbiotycznej mikroflory pochodzącej z naszego środowiska na ludzkie zdrowie.

Źródło: Mills i in., 2019.

PYTANIE DO REFLEKSJI

Patrząc na ilustrację 9.5.1., spróbuj odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób przywracanie w otoczeniu dzikiej przyrody wpływa na nasze zdrowie.

Znaczenie przyrody dla człowieka najłatwiej wycenić, patrząc na straty, jakie ponosi gospodarka z powodu antropogenicznych przekształceń ekosystemów (także tych powodowanych przez zmianę klimatu). Koszty takich przekształceń są często oczywiste. Na przykład niszczenie lasów namorzynowych likwiduje pożyteczną barierę ochraniającą brzeg i ludzkie siedziby przed ekspansją morza podczas burz i huraganów. Jej obecność ma szczególne znaczenie wobec nasilania się gwałtownych zjawisk atmosferycznych spowodowanych przez zmianę klimatu. Wiele obecnie zanikających, bogatych przyrodniczo ekosystemów stanowiło podstawę funkcjonowania lokalnych społeczności i źródło licznych usług ekosystemowych dla społeczności zewnętrznych. Straty gospodarcze spowodowane obumarciem samych raf koralowych zostały wycenione na co najmniej bilion dolarów.

KAŻDA ZMIANA W EKOSYSTEMIE W MNIEJSZYM LUB WIĘKSZYM STOPNIU WPŁYWA NA KLIMAT

Biosfera, czyli globalny ekosystem, to skomplikowana sieć złożonych zależności między ożywionymi i nieożywionymi elementami przyrody. Każda ingerencja rodzi wiele trudno przewidywalnych skutków, także tych obejmujących system klimatyczny naszej planety. Spowodowane przez zmianę klimatu susze przyspieszają erozję i jałowienie gleb oraz degradację torfowisk. Powoduje to nie tylko zwiększenie zasięgu suszy (dodatnie sprzężenie zwrotne), ale także uwalnianie dużych ilości dwutlenku węgla, co przyspiesza ocieplanie się klimatu (kolejne dodatnie sprzężenie zwrotne).

Stopień skomplikowania ekosystemu powoduje, że często trudno dostrzec wpływ, jaki ingerencje w niego wywierają na klimat. Na przykład, czy zmniejszenie populacji walenii może prowadzić do ocieplenia? Przypomnij sobie zamieszczoną w podrozdziale 9.3. graficzną opowieść o wydrach morskich (ilustracja 9.3.3.). W ostatnich latach poszerzyła się ona o kolejnych aktorów i kolejne fakty. Dzięki trwającym wiele lat wysiłkom ekologów wydry powróciły na wybrzeża Pacyfiku i podwodne lasy wodorostów zaczęły się odradzać. Wkrótce jednak ich liczebność ponownie spadła. Okazało się, że polują na nie teraz orki zmuszone do zmiany diety wskutek zubożenia populacji ich tradycyjnych ofiar: lwów morskich i fok. Będąca przyczyną tego zjawiska zbyt silna presja na populacje wydr spowodowana była wcześniejszym wyeliminowaniem przez człowieka dużych walenii, tradycyjnego pokarmu orek. Polowania na walenie doprowadziły więc do ponownego zaniku podwodnych lasów wodorostów, czyli zmniejszenia obszarów roślinnych wiążących znaczne ilości dwutlenku węgla. Jak podają ostatnie badania, ich ekosystem wiąże rocznie od 13 do 43 milionów ton tego gazu. Masowe polowania na walenie mogą więc mieć większy wpływ na globalne ocieplenie niż zjawiska będące bezpośrednim skutkiem uwalniania dwutlenku węgla zdeponowanego w ich biomasie. Przykład ten pokazuje stopień wzajemnych powiązań w globalnym ekosystemie: jest on na tyle duży, że każda znacząca ingerencja pociągnie za sobą najprawdopodobniej istotne konsekwencje dla systemu klimatycznego naszej planety.

Dla zainteresowanych:
www.pasykwietne.wordpress.com





KLIMATYCZNE
ABC

WIKTOR KOTOWSKI

ORCID 0000-0002-1486-2408, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997, Uniwersytet Warszawski

10. Połączenia. Jak zmiany w biosferze wpływają na klimat?

Z rozdziału 1. wiesz już, że w systemie klimatycznym, obok wymuszeń, znaczącą rolę odgrywają **sprzężenia zwrotne**, czyli takie reakcje ziemskiego systemu klimatycznego na zmianę klimatu, które ją ograniczają (ujemne sprzężenia zwrotne) lub potęgują (dodatnie sprzężenia zwrotne). Jak zapewne pamiętasz, część sprzężeń dodatnich w systemie klimatycznym Ziemi ujawnia się lub intensyfikuje, kiedy zaburzenia (na przykład spowodowane przez człowieka) doprowadzają do przekroczenia określonych punktów krytycznych. W rozdziałach 8. i 9. mówiliśmy o tym, jak wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze i będące jego efektem ocieplenie klimatu wpływają na przyrodę nieożywioną i ożywioną. Teraz chcemy połączyć te informacje. Podsumujemy wiedzę na temat rodzajów klimatycznych sprzężeń zwrotnych i opiszemy nieco szerzej te, które są związane bezpośrednio z **cyklem węglowym** (a więc wpływają na zawartość dwutlenku węgla i metanu w atmosferze) i mogą być modyfikowane przez nasze oddziaływanie na ekosystemy Ziemi. Zwrócimy uwagę, jak zmiany w biosferze, o których pisaliśmy w rozdziale 9., 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 jego zmianę. Opiszemy szerzej interakcję klimatu z ekosystemami lądowymi, w których nasza działalność może zarówno pogłębiać globalne ocieplenie, jak i je ograniczać.

Dodatkowo, aby pokazać szerszy obraz wpływu człowieka na biosferę, omówimy koncepcję **granic planetarnych**, zwracając uwagę na fakt, że zmiana klimatu nie jest jedynym globalnym problemem wywołanym przez człowieka, a w dodatku, zdaniem naukowców, wcale nie najbardziej zaawansowanym. Co więcej, między różnymi przejawami antropopresji istnieją powiązania przyczynowo-skutkowe z reguły wzmacniające destabilizację biosfery i naszej cywilizacji. Wskażemy zarazem najważniejsze miejsca, w których konieczna i wciąż możliwa jest **naprawa zaburzonych systemów przyrodniczych**. Zapamiętaj te kwestie – wrócimy do nich w ostatnim rozdziale poświęconym działaniom adaptacyjnym i mitygującym (ograniczającym zmianę klimatu).

WIKTOR KOTOWSKIORCID 0000-0002-1486-2408
Uniwersytet Warszawski**ALEKSANDRA KARDAŚ**ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski

10.1. 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 – w skali zarówno globalnej, jak i regionalnej.



Unsplash; Yann Allegre



SPRZĘŻENIA:



DODATNIE



UJEMNE

Klimatyczne sprzężenia zwrotne wpływają zarówno na zawartość gazów cieplarnianych, a w szczególności dwutlenku węgla w atmosferze (są to sprzężenia cyklu węglowego), jak i bezpośrednio na temperaturę (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 emisji gazów cieplarnianych, ale także wzmacnianie lub osłabianie klimatycznych sprzężeń zwrotnych. Poniżej wymieniamy najważniejsze sprzężenia klimatyczne i wskazujemy, czy i jak nasze działania mogą je modyfikować.

1. SPRĘŻENIA NIEZWIĄZANE Z CYKLEM WĘGLOWYM



1.1. Zmiany w zachmurzeniu

Ocieplenie klimatu powoduje zwiększone parowanie, a tym samym 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 w skali globalnej przeważa jednak efekt dodatni i zmiany w zachmurzeniu pogłębiają ocieplanie się klimatu (Norris i in., 2016). Sprężenia związane z chmurami mają różne tempo, większość z nich zalicza się do kategorii sprężen szybkich. Co więcej, niedawne badania wskazują, że postępujący wzrost temperatury może spowodować zanik stratocumulusów nad oceanem, co wywoła potężne dodatnie sprężenia zwrotne, prowadzące do wzrostu globalnej temperatury o kilka stopni Celsjusza (Schneider i in., 2019).

Czy i jak wpływamy na wielkość sprężenia?

Czynnikiem wpływającym na tworzenie i utrzymywanie się chmur jest występowanie aerozolu atmosferycznego pochodzenia naturalnego i antropogenicznego. Wpływanie na własności chmur morskich jest jednym z proponowanych geoinżynierskich działań ograniczających zmianę klimatu.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Geoinżynieria, czyli jak naprawić klimat



1.2. Wzrost zawartości pary wodnej w atmosferze

Cieplejsza atmosfera zatrzymuje coraz więcej pary wodnej będącej silnym gazem cieplarnianym. Jest to jedno z najszybciej działających dodatnich sprężen zwrotnych.

Choć zmieniając stopień pokrycia lądów roślinnością, wpływamy na ich parowanie, nie ma to jednak większego znaczenia dla zawartości pary wodnej w atmosferze, ponieważ głównym elementem tego sprężenia jest parowanie z oceanów, które pozostaje poza naszą kontrolą.



1.3. Uwalnianie innych substancji do atmosfery

Wzrost temperatury oraz zmiana funkcjonowania ekosystemów mogą wpływać na uwalnianie z biosfery takich gazów, jak tlenek azotu(I) pochodzący z rozkładu torfu i topniejącej wiecznej zmarzliny (dodatnie sprężenie zwrotne) czy siarczek dimetylu z oceanów (ujemne sprężenie zwrotne). Należy do stosunkowo wolnych sprężen klimatycznych.



Osuszanie torfowisk i nawożenie zwiększa emisje tlenku azotu(I). Zaniechanie takich działań, a zwłaszcza przywracanie terenów podmokłych może więc osłabić siłę tego sprężenia.



UW: Mirosław Kaźmierczak



1.4. Topnienie lodu morskiego, lodowców i zmiana albedo

Topniejący lód odsłania otwartą wodę lub ląd, które odbijają mniej światła słonecznego. Zwiększone pochłanianie promieniowania słonecznego powoduje wzrost temperatury, co przyspiesza topnienie lodu. Tempo procesów odpowiedzialnych za to sprzężenie jest stosunkowo szybkie w przypadku lodu morskiego, natomiast znacznie wolniejsze w przypadku lądolodów.

Sadza i inne pyły powstające w procesach przemysłowych lub w wyniku pożarów osiadają na lodzie, zmniejszając albedo i przyspieszając topnienie lodowców.



1.5. Wypromieniowywanie podczerwieni w przestrzeń kosmiczną

Im cieplejsza jest atmosfera Ziemi, tym więcej energii „ucieka” w kosmos w postaci promieniowania podczerwonego. Niestety, wynikający z tego sprzężenia efekt spowalniający ocieplenie jest znacznie mniejszy niż wzrost temperatury spowodowany 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. SPRZĘŻENIA ZWIĄZANE Z CYKLEM WĘGLOWYM



2.1. Wietrzenie skał

Wietrzenie skał powoduje usuwanie dwutlenku węgla z atmosfery, jest to jednak proces powolny, którego skutki mają znaczenie w skali tysięcy lat.

Czy i jak wpływamy na wielkość sprzężenia?

Sztuczne zwiększanie powierzchni skał narażonych na wietrzenie jest jednym z proponowanych rozwiązań geoinżynierskich ograniczających zmianę klimatu (Beerling i in., 2018).



2.2. Zmniejszenie pochłaniania CO₂ przez oceany

Rozpuszczalność gazów w wodzie maleje ze wzrostem temperatury, coraz mniejsza część dwutlenku węgla emitowanego przez człowieka i uwalnianego w procesach sprzężeń zwrotnych jest więc pochłaniana przez oceany. Przyczynia się do tego również wzrost stratyfikacji termicznej oceanów oraz zmiany cyrkulacji termohalinowej.

Zjawiska te pozostają poza naszą kontrolą.

Stratyfikacja termiczna

– układ warstw wody, w którym wody cieplejsze, a więc o mniejszej gęstości, pozostają nad wodami zimniejszymi i gęstszymi; pomiędzy warstwami występuje termoklina, czyli strefa skokowej różnicy temperatur i ograniczonego mieszania się wód.

Cyrkulacja termohalinowa

– globalny obieg wód oceanicznych spowodowany różnicami gęstości wody morskiej w zależności od zasolenia i temperatury.

2.3. Wzrost produktywności ekosystemów (efekt „nawożenia” CO_2)

Podwyższona zawartość CO_2 w powietrzu powoduje w niektórych ekosystemach szybszy wzrost roślin i zwiększa ilość węgla związanego w biomase roślinnej. Ten efekt występuje jednak tylko w tych ekosystemach, w których węgiel jest pierwiastkiem limitującym wzrost roślin, na przykład w mszystych torfowiskach. Najczęściej jednak czynnikami ograniczającymi są azot, fosfor lub woda. Gdy ich brakuje, wyższe stężenie dwutlenku węgla w atmosferze nie pociągnie za sobą tego zjawiska. Jest to stosunkowo wolne sprzężenie.

Zastępowanie lasów i mokradeł uprawami rolnymi oraz degradacja ekosystemów lądowych związana z suszami lub zubożeniem gleb zmniejszają znaczenie tego sprzężenia. Zarazem działalność człowieka znacząco zwiększa dostępność azotanów i fosforanów w środowisku, co lokalnie zwiększa produkcję pierwotną, powodując większą absorpcję CO_2 .

Unsplash; Benjamin Davis

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 prowadzących rozkład materii organicznej. Może to spowodować, że nawet przy podwyższonej produkcji pierwotnej bilans węgla będzie w ekosystemie ujemny: więcej dwutlenku węgla będzie z niego uciekać i uwalniać się do atmosfery 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.



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 uwalniają się, gdy marzłota – pod wpływem wzrostu temperatury – ustępuje. Sprężenie wolne.

Wydobycie gazu i ropy naftowej w Arktyce powoduje erozję torfów pokrywających zmarzlinę i przyspiesza jej topnienie.

flickr, Boris Radosavljevic



2.7. Rozkład torfu

W podwyższonej temperaturze część torfowisk wyschnie, co pociągnie za sobą rozkład torfu i emisję znacznych ilości dwutlenku węgla. Sprężenie o skali czasowej dziesiątek lat, rząd wielkości szybsze niż ujemne sprężenie związane z pochłanianiem CO₂ w wyniku akumulacji torfu.

Osuszanie torfowisk na cele rolnicze i leśne zmienia je z pochłaniaczy CO₂ w znaczące źródła tego gazu.

Więcej o torfowiskach w podrozdziale 10.3.



2.8. Akumulacja nowych pokładów torfu

Wzrost temperatury i zawartości dwutlenku węgla w atmosferze może zwiększyć tempo akumulacji torfu tam, gdzie utrzymuje się wysokie uwodnienie. Bagna mogą też rozprzestrzeniać się na nowe obszary. Jest to niestety znacznie wolniejszy proces niż sprężenie dodatnie związane z rozkładem torfu w wyniku degradacji torfowisk.

Osuszanie mokradeł i zmiany krajobrazu zaburzające bilans wodny (regulacje rzek, wylesienia) zatrzymują procesy torfotwórcze. Możemy jednak odtwarzać procesy powstawania bagien, ponownie nawadniając osuszone torfowiska oraz inicjować je w nowych miejscach, zatrzymując wodę w krajobrazie.



Warto zajrzeć do tekstów nt. restytucji torfowisk
www.life-peat-restore.eu/pl



2.9. Pożary torfowisk

Na znacznie przesuszonych torfowiskach może dochodzić do pożarów torfu, a tym samym do gwałtownych emisji dwutlenku węgla.

Jedno z najszybszych sprzężeń cyklu węglowego w obrębie ekosystemów lądowych.

Sprzężenie zwrotne znacząco powiązane z gospodarką człowieka, ponieważ pożary torfu występują niemal wyłącznie na torfowiskach osuszonych przez człowieka. Możemy je ograniczyć przez restytucję przyrodniczą (ponowne nawadnianie) torfowisk.



2.10. Wysychanie lasów deszczowych

Wzrost parowania spowodowany ociepleniem klimatu wywołuje zamieranie tropikalnych lasów deszczowych stanowiących ogromny rezerwuár węgla organicznego – zarówno w żywej biomase drzew, jaki i w glebach. Jednocześnie powstaje powiązane hydrologicznie 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 rozkładu obumierających roślin. Sprzężenie o średnim czasie reakcji.

Wylesienia powodują, że pozostałe płaty lasów są mniej odporne na suszę; podobny skutek mają cięcia selektywne (usuwanie dużych drzew).



2.11. Pożary lasów

Deficyt wody spowodowany zwiększonym parowaniem oraz wysokie temperatury powodują pożary lasów, które są źródłem gwałtownych emisji dwutlenku węgla do atmosfery; uruchamia się wówczas silne sprzężenie związane z osłabionym lądowym obiegiem wody. Dość szybkie sprzężenie w porównaniu z innymi procesami w cyklu węglowym.

Zastępowanie lasów wielogatunkowych monokulturami bardzo znacząco zwiększa ich podatność na pożary; gospodarka żarowa (wypalanie lasów, zarośli i łąk) zwiększa prawdopodobieństwo zaproszenia ognia.



Więcej o lasach
w podrozdziale 10.3.

Na przełomie 2019 i 2020 roku w Australii wystąpiły pożary lasów i zarośli o niespotykanej wcześniej skali. Objęły ponad 100 tysięcy km², powodując emisję kilkuset milionów 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 wyjątkowo wysokich temperatur.



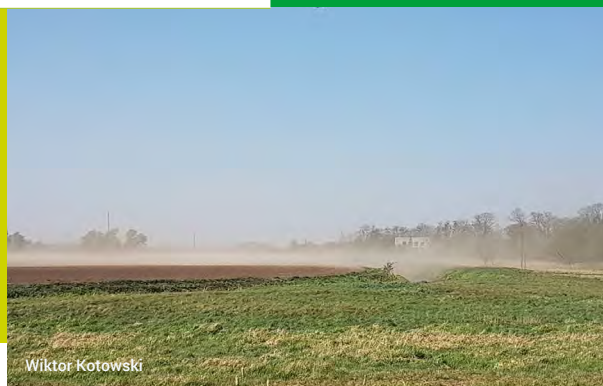
2.12. Pustynnienie i erozja gleb

Wzrost temperatury i deficyty wody powodują zanik roślinności i rozkład materii organicznej w glebach; coraz większą powierzchnię zajmują skrajnie suche ekosystemy (pustynie, półpustynie, suche stepy) o niewielkiej zawartości węgla organicznego. Sprężenie działa w skali dziesięcioleci.

Pustynnienie jest wzmacniane przez pobór wód gruntowych dla rolnictwa oraz intensywną gospodarkę pasterską.



Więcej o ekosystemach rolniczych w podrozdziale 10.3.



Wiktor Kotowski

ZAPAMIĘTAJ!

Sprężenia dodatnie działają zwykle szybciej niż sprężenia ujemne. Na przykład emisje spowodowane przyspieszonym rozkładem materii organicznej lub pożarami lasów zachodzą znacznie szybciej niż wzrost gromadzenia (sekwestracji) węgla w wyniku regeneracji lasów. Podobnie jest w przypadku emisji z rozkładu torfu, które w wysychających torfowiskach zachodzą co najmniej 10 razy szybciej niż usuwanie CO_2 z atmosfery w wyniku akumulacji torfu w warunkach bagiennych. Również dodatnie sprężenia zwrotne związane z przyrodą nieożywioną (np. ze zmianami albedo lub z parą wodną) działają znacznie szybciej niż sprężenia ujemne (np. związane z wietrzeniem skał). Dlatego dla ograniczania zmiany klimatu najważniejsze, obok zmniejszania emisji, są działania osłabiające sprężenia dodatnie, takie jak restytucja ekosystemów i transformacja rolnictwa.

10.2. 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 gospodarowanie ekosystemami lądowymi może znacząco wpłynąć na emisję lub pochłanianie węgla z atmosfery.

ZNACZENIE EKOSYSTEMÓW DLA WYMIANY I MAGAZYNOWANIA WĘGLA

Jak pamiętasz z rozdziału 2., zdecydowana większość węgla na Ziemi znajduje się w litosferze i głębinach oceanicznych. Bardzo powoli wymienia się on z węglem w atmosferze – obieg ten stanowi część wolnego cyklu węglowego. Natomiast rezerwuary węgla organicznego zgromadzone w ekosystemach lądowych, słodkowodnych oraz w powierzchniowych warstwach mórz i oceanów należą do szybkiego cyklu węglowego, który z naszej ludzkiej perspektywy ma dużo 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 znajduje się w żywych organizmach oraz w tzw. martwej materii organicznej: glebach, osadach i substancjach rozpuszczonych w wodach.

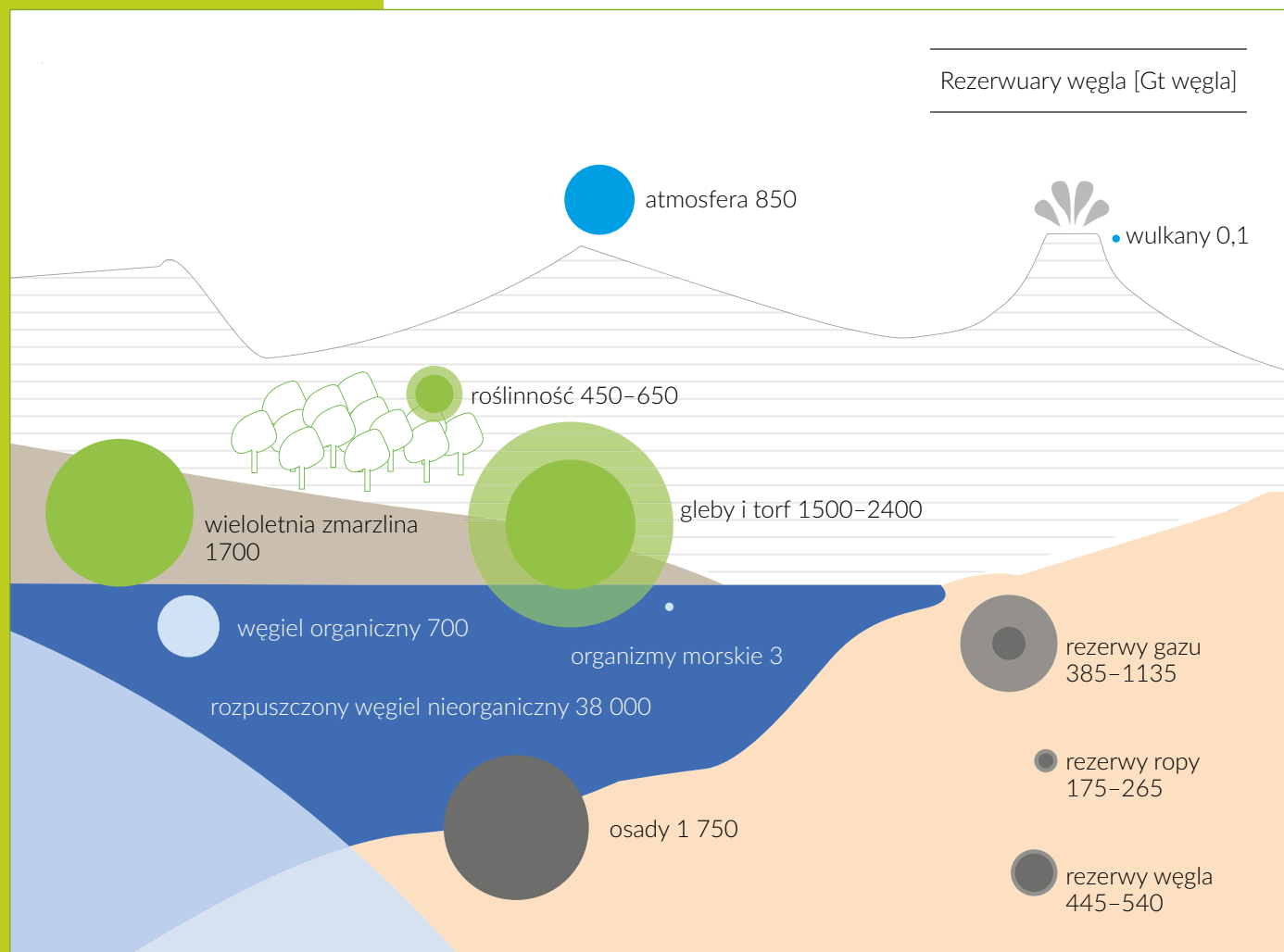
Proporcje między węglem nieorganicznym i organicznym różnią się znacznie w oceanach i ekosystemach lądowych. Jak widzisz na ilustracji 10.2.1., w oceanach prawie cały węgiel występuje w formie nieorganicznej – to rozpuszczony w wodzie dwutlenek węgla i jony wodorowęglanowe zawierające łącznie ok. 38 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). Przy tych wielkościach węgiel organiczny zawarty w żywych organizmach stanowi niemal pomijalną ilość ok. 3 gigaton.



Oznacza to, że szybki cykl węglowy obejmujący oceany wynika w głównej mierze z procesów fizykochemicznych, czyli rozpuszczania i dysocjacji CO_2 w wodzie oraz zmian tej rozpuszczalności w wyniku wahań temperatury. Nie mamy na nie wpływu.

CZY WIESZ, ŻE ?

Czas pozostawania węgla organicznego w ekosystemach lądowych może być bardzo różny. Zależy to od typu ekosystemu, szerokości geograficznej (a więc lokalnego klimatu) oraz naszego gospodarowania systemami lądowymi (o tym więcej w rozdziale 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 wykraczając poza przedział czasowy szybkiego cyklu węglowego, są bagna oraz ekosystemy z wieczną (wieloletnią) zmarzliną.



Ilustracja 10.2.1. Najważniejsze globalne magazyny węgla. Na zielono zaznaczono zasoby węgla w ekosystemach lądowych, na które możemy wpływać poprzez zarządzanie gospodarką na lądach.

Na podstawie: Friedlingstein i in., 2019.

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 spowodowały zmniejszenie produktywności ekosystemów. W związku z tym procesem maleje również pula węgla glebowego – węgiel zawarty niegdyś w roślinach i glebach zasilił pulę atmosferyczną, a następnie w większości rozpuścił się w oceanie.

Na lądach sytuacja jest odmienna. Pula węgla uczestnicząca w szybkim cyklu to przede wszystkim węgiel organiczny. W biomasie organizmów lądowych 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 biomasie roślinnej, jak i pula glebowa odgrywają 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.

10.3. Klimat a ekosystemy lądowe

Działalność gospodarcza człowieka pociąga za sobą znaczący spadek pochłaniania dwutlenku węgla przez lądowe ekosystemy. Znamy jednak sposoby na zahamowanie tego zjawiska – teraz najważniejsze jest wprowadzenie ich jak najszybciej w życie.



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. Na lądach mamy jednak szansę na ograniczenie zmiany klimatu i adaptację do niej – na przykład poprzez zalesienia, restytucję ekosystemów czy reformę rolnictwa. Dlatego państwa-strony Konwencji Klimatycznej w czasie konferencji w Paryżu w 2015 roku zwróciły się do Międzyrządowego Panelu ds. Zmiany Klimatu (IPCC) o przygotowanie specjalnego raportu, który miał zawierać analizę wyników badań dotyczących interakcji między klimatem a procesami zachodzącymi w ekosystemach lądowych – pustynnieniem, degradacją ekosystemów, wylesianiem – a także wskazać możliwości oraz potencjał adaptacji do tych zjawisk i ich mitygacji. Raport „Klimat a lądy – specjalne sprawozdanie IPCC w sprawie zmiany 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 opisujące interakcje między ekosystemami lądowymi a zmianą klimatu. Do rekomendacji IPCC dotyczących adaptacji do zmiany klimatu i jej ograniczania wrócimy w końcowych rozdziałach książki.

Najważniejsze
wnioski
z raportu IPCC
z 2019 roku

Dziś człowiek użytkuje bezpośrednio ponad 70% niepokrytej lodem powierzchni lądów – pola uprawne (12%), łąki i pastwiska (37%) oraz lasy (22%) wykorzystywane przede wszystkim do pozyskania drewna. Tylko 16% zajmują ekosystemy nieobjęte znaczącym wpływem działalności człowieka (z czego lasy to 9%). Pozostałe 12% to tereny pozbawione roślinności (pustynie, skały).

Od okresu przedprzemysłowego temperatura nad lądami wzrosła do dwukrotnie wyższych wartości niż średnia temperatura globalna, co spowodowało m.in. pustynnienie i degradację gleb oraz poważnie zmniejszyło 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).

Zarazem badania wskazują, że ekosystemy lądowe pochłaniają więcej dwutlenku węgla w odpowiedzi na antropogeniczny wzrost koncentracji tego gazu w atmosferze (efekt „nawożenia” CO₂) oraz zwiększenie ilości azotanów w środowisku. W ten sposób zaabsorbowały prawdopodobnie 29% naszych całkowitych emisji w latach 2007–2016. Niestety, modele wskazują, że zdolność ekosystemów lądowych do absorbowania CO₂ będzie maleć wraz z dalszym ocieplaniem klimatu.

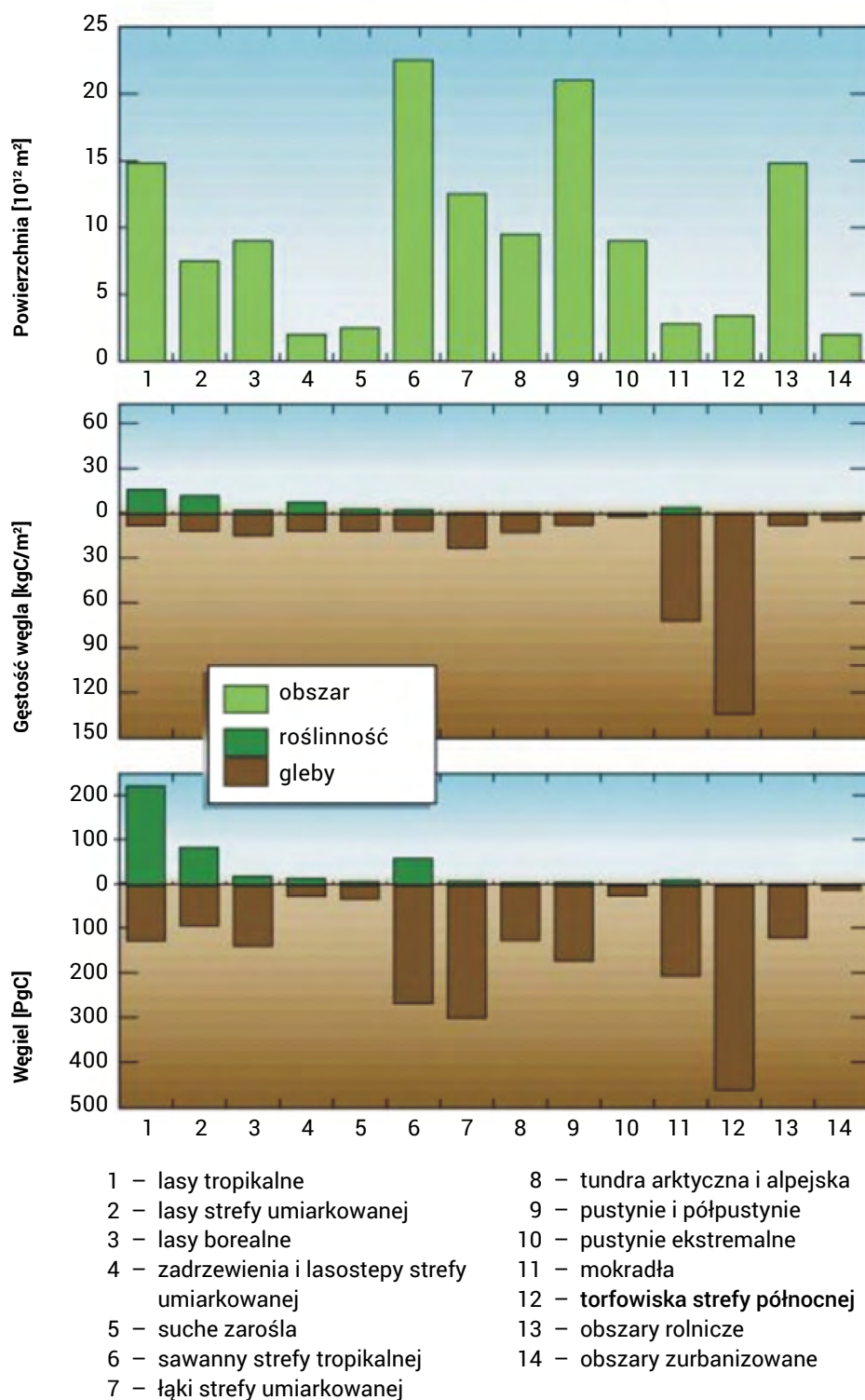
Wpływ zmian w ekosystemach lądowych na klimat jest wieloaspektowy i uwzględnia efekty globalne i lokalne. Do efektów globalnych należą przede wszystkim przepływy (emisje i absorpcje) gazów cieplarnianych oraz spadek albedo spowodowany zmianą pokrycia powierzchni lądów roślinnością. Lasy pochłaniają więcej promieniowania słonecznego niż obszary otwarte, w tym rolnicze, wylesianie ma zatem jednocześnie wpływ ogrzewający (wskutek emisji CO₂) oraz oziębiający (wskutek rosnącego albedo). Badania wskazują, że od epoki przedprzemysłowej do dziś wpływy te znacząco wzajemnie się niwelowały i efekt netto jest niewielki. Przewiduje się jednak, że w wyniku postępujących procesów deforestacji i degradacji ekosystemów w przyszłości przeważy skutek ogrzewający. 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 poprzez zarządzanie ekosystemami lądowymi przynosi wiele dodatkowych korzyści, takich jak: zapobieganie pustynnieniu 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 one w przeliczeniu na jednostkę powierzchni oraz powierzchnię zajmowaną przez nie w skali całego globu (ilustracja 10.3.1.). Co ciekawe, jeśli uwzględnimy zarówno węgiel zawarty w żywej biomasie, jak i węgiel glebowy, okaże się, że największymi globalnymi magazynami węgla organicznego, wbrew powszechnym przypuszczeniom, nie są wcale lasy, ale bagna, które na 3% powierzchni lądów zakumulowały w torfie od 0,5 do 1 Gt węgla.



Ilustracja 10.3.1. Powierzchnia, gęstość węgla w przeliczeniu na powierzchnię oraz całkowita pula węgla zawarta w biomasie i glebach głównych ekosystemów świata. 1 PgC (pentagram węgla) = 10^{15} g C

Na podstawie: Parish i in., 2008.

Uwaga: w niedawnej publikacji Nichols i in. (2019) podali nawet dwukrotnie wyższą zawartość węgla w północnych torfowiskach. Ponieważ w literaturze trwa dyskusja na temat poprawności metodyki tych badań, lepiej przyjmować dość duży zakres niepewności co do torfowiskowej puli węgla (500–1000 Gt), co nie zmienia faktu, iż jest to najefektywniejszy magazyn tego pierwiastka w lądowej biosferze.

Źródło: Joosten i Couwenberg, 2008.

PRZEPŁYWY

Jak może pamiętać z rozdziału 2., ekosystemy absorbują dwutlenek węgla z atmosfery w procesie fotosyntezy, w którym rośliny i inne samożywne organizmy (np. glony, cyjanobakterie) zamieniają obecny w nim węgiel na cukry i inne związki organiczne, z których są zbudowane. Z kolei w procesie oddychania komórkowego, polegającego na odzyskiwaniu energii zawartej w związkach organicznych na potrzeby procesów życiowych, powstaje dwutlenek węgla. W wyniku oddychania roślin, zwierząt i mikroorganizmów węgiel powraca więc do atmosfery w postaci dwutlenku węgla i częściowo w postaci metanu, który jest wytwarzany w procesie oddychania beztlenowego zachodzącego m.in. na mokradłach, ale też w przewodach pokarmowych zwierząt hodowlanych.

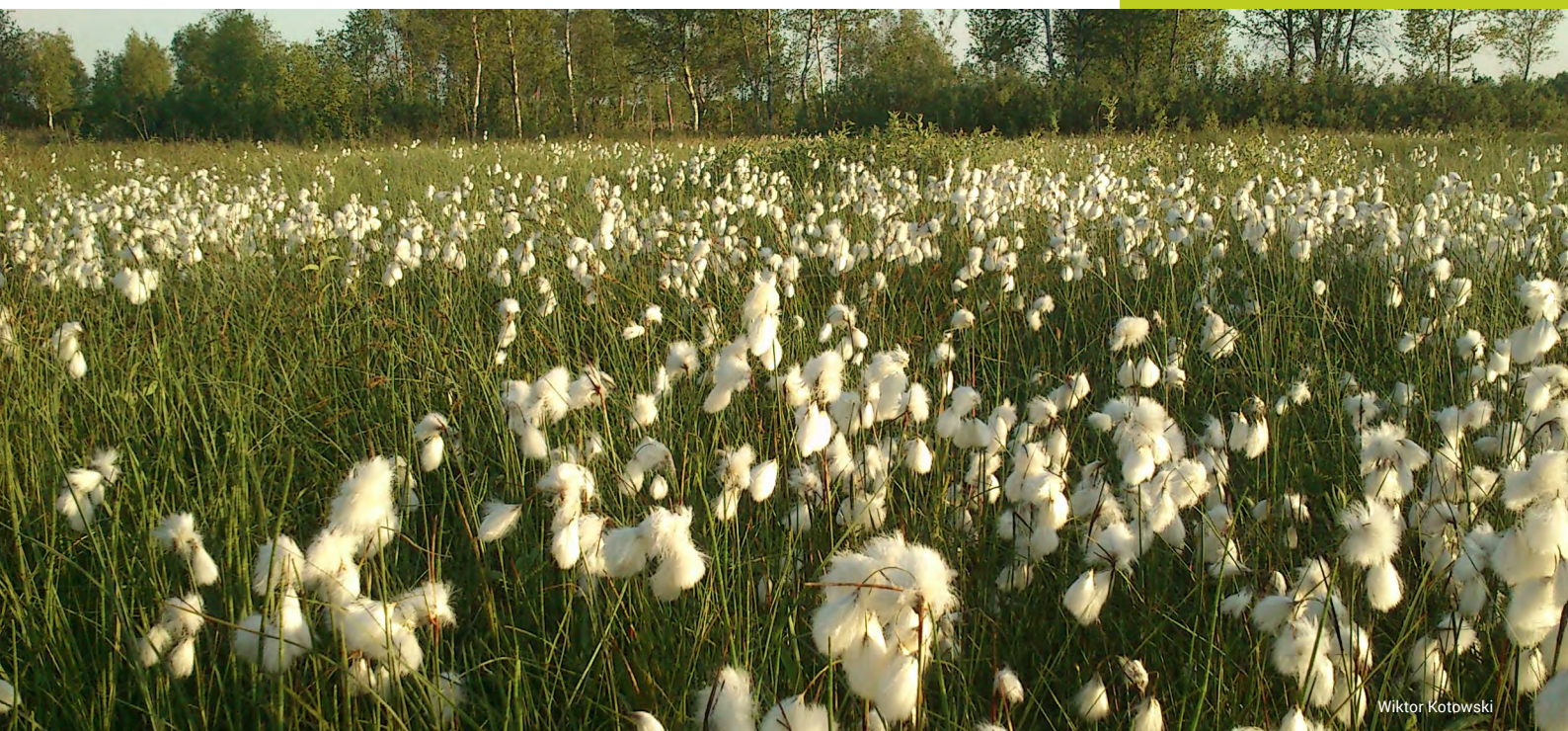
Stabilny ekosystem pozostaje w stanie względnej równowagi między pochłanianiem i uwalnianiem CO_2 , choć w długiej perspektywie pochłanianie nieco przeważa, ponieważ część węgla zostaje pogrzebana w osadach morskich lub bagiennych i nie wraca do atmosfery. Ekosystemy nie zawsze jednak są w stanie równowagi, działania człowieka zaś zwykle je z niej wytrącają. Co więcej, zmieniający się klimat może wpływać zarówno na tempo pochłaniania CO_2 (poprzez stymulowanie wzrostu roślin), jak i na jego uwalnianie (kiedy rośnie tempo rozkładu materii organicznej). Bilans wymiany węgla między ekosystemem a atmosferą może być więc wyraźnie ujemny lub dodatni. **Ekosystemy o bilansie dodatnim, które akumulują węgiel, nazywa się pochłaniaczami węgla (*carbon sinks*). Ekosystemy o bilansie ujemnym, tracące więcej węgla niż go asymilujące, to źródła węgla (*carbon sources*).** W wyniku działań człowieka wiele ekosystemów, które funkcjonowały jako pochłaniacze, zmienia się w źródła – zwłaszcza w postaci emisji dwutlenku węgla – uruchamiające kolejne dodatnie klimatyczne sprzężenia zwrotne. Przyjrzyjmy się teraz trzem typom ekosystemów lądowych, odgrywającym najważniejszą rolę w klimatycznych sprzężeniach zwrotnych, na których 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 biomase roślin, w szczególności w drzewach, a także w glebie. Dojrzały las naturalny w stanie równowagi odgrywa przede wszystkim rolę magazynu węgla, choć w warunkach zwiększonej koncentracji CO_2 może niekiedy czasowo działać jako pochłaniacz węgla. Deforestacja, a także selektywna wycinka drzew z reguły zmienia lasy w źródła CO_2 . Z kolei regeneracja lasów na terenie wylesionym powoduje, że staje się on pochłaniaczem węgla. Aby jednak pełnił tę funkcję skutecznie, powinno się to wiązać z trwałym magazynowaniem węgla. 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, w którym 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 rozkła-

dającym się drewnem. Współczesne leśnictwo wzmaga 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 zwiększenie powierzchni lasów naturalnych, których główną rolą będzie magazynowanie węgla, a zarazem ochrona przyrody.

Zalesianie można prowadzić, sadząc młode drzewa, ale proces ten może też zachodzić na drodze naturalnej sukcesji – na przykład w wyniku zaprzestania intensywnego wypasu bydła. W opublikowanej niedawno pracy (Bastin i in., 2019) podano optymistyczne oszacowanie, że w skali świata dostępnych do zalesienia jest nawet miliard hektarów gruntów, a rozwój lasów na nich do czasu osiągnięcia dojrzałości (ok. 100–200 lat) pozwoliłyby 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 tego gazu z oceanów. Pamiętajmy też, że wzrost zalesienia spowodowałby spadek albedo, efekt klimatyczny netto byłby więc i z tego względu mniejszy niż wynikający z akumulacji dwutlenku węgla. Zarazem zalesienia zwiększają retencję wody i wzmacniają jej lokalny obieg, co wywołuje lokalnie efekt ochłodzenia.



Wiktor Kotowski

TORFOWISKA I BAGNA

Bagna to, w pewnym uproszczeniu, ekosystemy aktywnie akumulujące torf, czyli „żywe” torfowiska. Torf jest skałą osadową powstającą ze szczątków roślin. Dzięki nasyceniu podłoża wodą, która ogranicza dostęp tlenu, rozkład materii organicznej jest znacznie spowolniony, w związku z czym część zasymilowanego przez rośliny węgla jest unieruchamiana w torfie. Akumulacja torfu jest jednym z najefektywniejszych mechanizmów pochłaniania węgla w biosferze lądowej. Wprawdzie proces ten zachodzi powoli – pokład torfu przyrasta w tempie ok. 1–2 mm na rok, co przekłada się na akumulację kilku



Warto obejrzeć film o programie nawadniania torfowisk w Rosji

https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/15_markina_restoring_peatlands_in_russia.pdf



Warto zajrzeć do raportu **Smoke on Water: Countering Global Threats from Peatland Loss and Degradation** przygotowanego na zlecenie ONZ.

www.grida.no/publications/355

ton CO₂ na hektar rocznie, a w skali globalnej ok. 400 milionów ton (ok. 1% emisji antropogenicznych) – ale jest to magazynowanie trwałe, w sprzyjających warunkach na tysiące, a nawet miliony lat (pokłady węgla brunatnego i kamiennego powstały wszak z torfu na bagnach sprzed milionów lat).

Z naszej perspektywy czasowej znacznie ważniejsza jest jednak rola torfowisk jako magazynów węgla. Zajmując zaledwie 3% powierzchni lądów, zgromadziły one w torfie 500–1000 Gt węgla, co przekracza przynajmniej dwukrotnie jego ilość w biomasie światowych lasów. Jeśli nie zachowamy bagien w stanie naturalnym, węgiel ten może w przyspieszonym tempie wrócić do atmosfery, potęgując efekt cieplarniany. Torfowiska osuszone i przekształcone w pastwiska, uprawy rolnicze lub leśne zmieniają się z pochłaniaczy w źródła dwutlenku węgla. Odwodniony torf zaczyna się rozkładać w wyniku działania mikroorganizmów, tak jak każda materia organiczna. Rozkładowi torfu towarzyszą emisje od kilku do nawet kilkuset ton dwutlenku węgla z hektara rocznie, co przekracza 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 około 5% emisji antropogenicznych.

POŻARY TORFOWISK

Niszczenie bagien prowadzi również do pożarów torfowisk, które są potężnym źródłem antropogenicznych emisji CO₂, stanowiąc zarazem wzmocnione przez człowieka silne sprzężenie klimatyczne.

Odwodnione torfowiska płoną od lat na całym świecie, a ostatnio skala i częstotliwość tych pożarów wyraźnie narastają. Ich pierwotną przyczyną są prawie zawsze odwodnienia torfowisk prowadzone ze względu na potrzeby rolnictwa lub gospodarki leśnej. W Indonezji ogromne pożary torfowisk pojawiły się zaledwie kilka lat po rozpoczęciu osuszania rozległych 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), (ilustracja 10.1.1.). Podobne pożary powtarzały 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 oraz 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 gęstym dymem, skłoniły władze do podjęcia decyzji o rozpoczęciu programu ponownego nawadniania tych terenów.

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 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 wgłębnego pożaru torfu – był to pożar powierzchniowy, który objął tylko suchą roślinność. Ryzyko było jednak duże, ponieważ torfowiska w środkowej części parku są odwodnione od ponad dwóch stuleci. Do długotrwałych pożarów torfu dochodziło tu kilkakrotnie w ciągu ostatnich 20 lat.

CZY WIESZ, ŻE ?

Rola bagien w przepływach gazów cieplarnianych, oprócz pochłaniania dwutlenku węgla, obejmuje też emisję 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 rozdziału 3., każda jego tona dodana do atmosfery ma większy wkład w ocieplenie klimatu niż tona CO_2 . Ponieważ jednak metan stosunkowo szybko utlenia się w atmosferze do CO_2 , jego potencjalny wpływ na efekt cieplarniany maleje z czasem. Dlatego jeśli rozpatrujemy wpływ bagien w krótkim (np. dziennym) oknie czasowym, jest on ocieplający, ale w kilkudziesięcioletnim okresie okazuje się on neutralny klimatycznie lub lekko ochładzający, ponieważ efekt usuwania węgla z atmosfery przeważa nad emisją stosunkowo niewielkich ilości metanu. Ponadto jeśli spojrzymy na to zjawisko z perspektywy setek lub tysięcy lat, bagna okażą się bardzo efektywnymi „schładzacami” atmosfery, zmniejszającymi efekt cieplarniany.

Torf pali się bezpłomieniowo, tłąc się przez wiele tygodni i generując ogromne ilości dymu.

Wiktor Kotowski

Ilustracja 10.3.2. Płonące torfowisko na Borneo w Królestwie Brunei.

Receptą na emisję dwutlenku węgla z odwodnionych torfowisk jest zaniechanie melioracji takich terenów i przywrócenie na nich warunków bagiennych. Warto podkreślić, że oprócz ograniczenia emisji CO_2 , odtwarzanie bagien jest jednym z najważniejszych sposobów retencji wody i lokalnego schładzania klimatu poprzez zwiększanie ewapotranspiracji (więcej informacji na ten temat znajdziesz w rozdziale 9.). Na razie jednak bagna należą do najszybciej ginących ekosystemów i stale osuszane są nowe obszary, 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 wolnej od lodu powierzchni świata. Zamiana naturalnych ekosystemów w systemy rolnicze spowodowała ucieczkę ogromnych ilości węgla organicznego do atmosfery. Co więcej, aktualnie dominujący sposób prowadzenia gospodarki rolnej pogłębia ten problem wskutek degradacji gleb, pociągającej za sobą przyspieszony rozkład materii organicznej. Szacuje się, że procesy degradacji gleb, powodujące utratę węgla organicznego, zachodzą na jednej czwartej powierzchni lądów pozbawionej lodu, a tempo erozji gleb na obszarach rolniczych jest 10–100 razy większe niż tempo ich formowania (IPCC, 2019). Ponadto należy uwzględnić znaczące emisje z samej produkcji rolnej, wynikające z wykorzystania nawozów (w tym emisje tlenu azotu(I)), wytwarzania metanu w przewodach pokarmowych krów i innych przeżuwaczy, emisję metanu z pól ryżowych, a także emisje związane ze zużyciem energii w zmechanizowanej produkcji rolnej.



Warto zajrzeć do artykułu: **Bez mokradeł nie zatrzymamy klimatycznej katastrofy** dostępnego na stronach <https://smoglab.pl/>



Warto obejrzeć film: **Po co nam bagna?** – prof. Wiktor Kotowski odpowiada w nim na tytułowe pytanie na przykładzie bagna Całowanie w okolicach Warszawy. Film jest dostępny na platformie YouTube.

Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

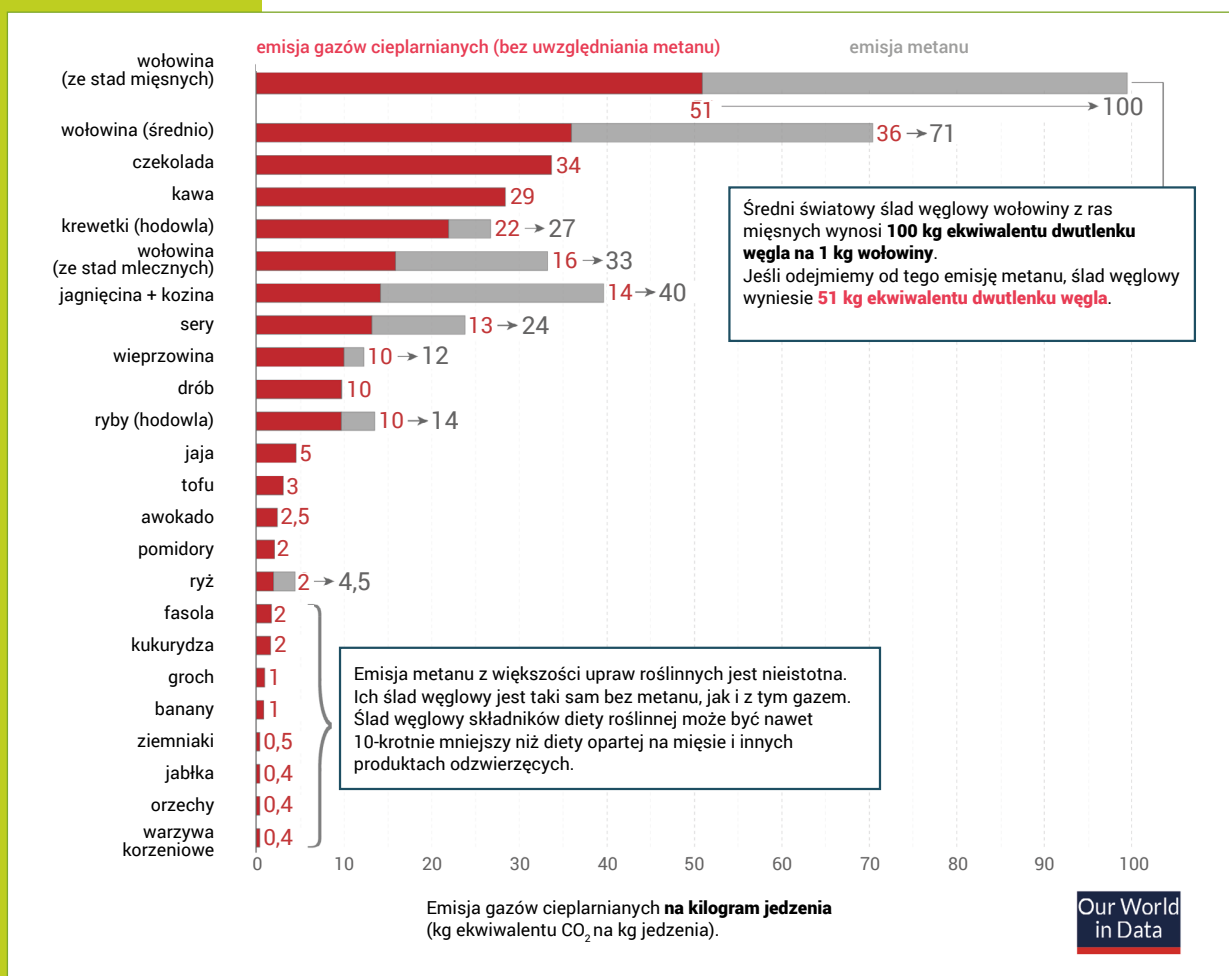
Klimatyczny ślad kotleta



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% 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 do nawodnienia upraw powoduje pustoszczenie okolicznych obszarów, co pogłębia zmianę klimatu i potęguje problem braku wody w przypadku nawracających susz.

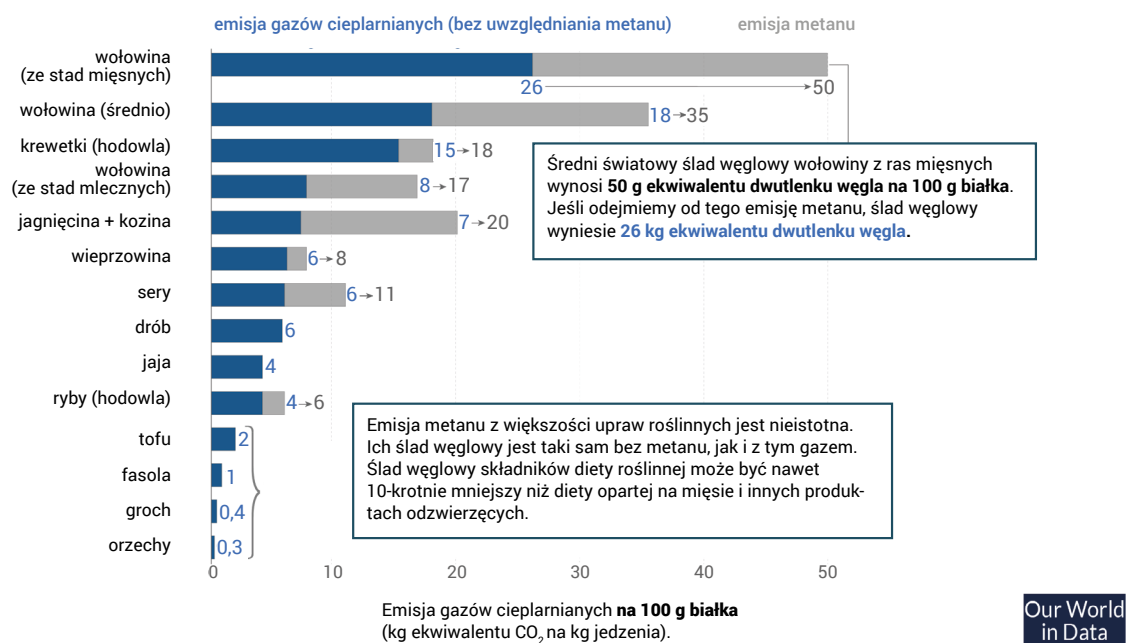
Do kluczowych działań ograniczających emisję dwutlenku węgla z sektora rolnego należy zmiana technik uprawy na takie, które ograniczają utratę węgla i przywracają jego pochłanianie przez gleby (dowiesz się o nich z ostatniego rozdziału tego podręcznika), oraz zmniejszanie zużycia wody.

Drugim niezmiernie ważnym kierunkiem jest zmniejszanie ilości mięsa i produktów zwierzęcych w diecie. Jak widać na ilustracjach 10.3.3. i 10.3.4., produkcja mięsa jest źródłem wielokrotnie większych emisji gazów cieplarnianych niż produkcja jadalnych roślin – również tych o wysokiej zawartości białka. 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.



Ilustracja 10.3.3. Emisja gazów cieplarnianych towarzysząca produkcji różnych rodzajów żywności w przeliczeniu na kilogram jedzenia.

Źródło: Our World in Data, 2020.



Ilustracja 10.3.4. Emisja gazów cieplarnianych towarzysząca produkcji żywności wysoko-białkowej w przeliczeniu na 100 g białka.

Źródło: Our World in Data, 2020.



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

Zmiana klimatu to nie jedyne znaczące przekształcenie środowiska wywołane działalnością człowieka. Co więcej, zdaniem części naukowców wcale nie jest to najbardziej palący problem, który musimy rozwiązać w skali planetarnej.

Różne zmiany w biosferze oddziałują na siebie i często wzmacniają się wzajemnie. Na przykład cieplejsze wody szybciej niż zimne reagują zakwitami glonów na przeżyźnienie (eutrofizację) będące konsekwencją dopływu azotów i fosforanów z pól uprawnych. Wylesienia spowodowane ekspansją rolnictwa pociągają za sobą wymieranie gatunków, ale też generują emisję CO₂, zwiększając efekt cieplarniany. Osłabiają 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 odpowiedzą na te zmiany. Czy w biosferze istnieją mechanizmy samoregulacji, które pozwolą jej dostosować się do zmieniającego się świata przy zachowaniu podstawowych procesów ekologicznych? Czy w antroposferze, gospodarce i kulturze istnieje potencjał adaptacyjny do zmian zachodzących w przyrodzie? Są to w istocie pytania o odporność systemu planetarnego na presję ze strony człowieka. Tak jak nadmuchiwany balon ma swoją wytrzymałość i nie może rozciągać się bez końca, tak systemy przyrodnicze i społeczny mają określoną **odporność**, której przekroczenie może spowodować zasadniczą zmianę w funkcjonowaniu świata. Balon po przekroczeniu możliwości rozciągnięcia gumy nie znika, ale zmienia się w taki sposób, że nie może już pełnić w żaden sposób swoich dotychczasowych funkcji. Czy tak samo może stać się z naszym światem?

Analogię z balonem możemy rozbudować. Czy znasz prosty eksperyment z balonem i sokiem z pomarańczy? Gdy nadmuchany balon skropimy takim sokiem, wejdzie on w reakcję chemiczną z gumą, co sprawi, 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 jego powłoka i tym mniej odporna staje się na dodatkową presję, jaką stanowi obecność 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 przetrzyma wszystko.

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.

Pytanie o odporność postawiliśmy w kontekście przyszłości systemu przyrodniczego i społecznego. Ale czy da się je oddzielić? W tym podrozdziale argumentujemy, że w antropocenie nie jest to już możliwe. Odporność systemu planetarnego to kwestia utrzymania stabilności światowych ekosystemów i najważniejszych cykli biogeochemicznych regulujących warunki życia. A także – z perspektywy człowieka – granic przekształceń biosfery, których przekroczenie zagrozi ciągłości naszej cywilizacji, gospodarki i 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 zmian katastrofalnych? Jak blisko jesteśmy tych granic? A może już je 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 i dostarczyła poważnych argumentów 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 nieźrównoważoną ścieżką rozwoju – raport Klubu Rzymskiego pt. *Limits of Growth (Granice wzrostu)* (Meadows i in., 1972). Jego autorzy wyszli z założenia, że stałego wzrostu liczby ludzi, produkcji towarów, eksploatacji zasobów i wytwarzania odpadów oraz zanieczyszczeń (a jest to wzrost wykładniczy, w którym tempo zmian jest coraz szybsze) 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 według kilku wybranych scenariuszy. Jeden z nich zakładał zasadniczy brak zmian w kursie gospodarki i coraz większe nastawienie zachodnich społeczeństw na konsumpcję. 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 powodujących zmianę 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 sobie nałożyć, by uniknąć katastrofy. Jak wiemy, z rekomendacji tych nie skorzystano.

Model Meadows i innych opierał się wyłącznie 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.

Typowe dla holocenu, czyli epoki geologicznej, której początek wyznaczono na 11,7 tys. lat temu – po zakończeniu ostatniego zlodowacenia – charakteryzującej się wyjątkowo stabilnymi warunkami klimatycznymi.

Antropocen to proponowany przez niektórych uczonych termin na określenie epoki geologicznej sięgającej początków znaczącego oddziaływania człowieka na geologię i ekosystemy Ziemi, m.in. poprzez antropogeniczną zmianę klimatu. Formalnie nie został dotychczas (grudzień 2021) 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.



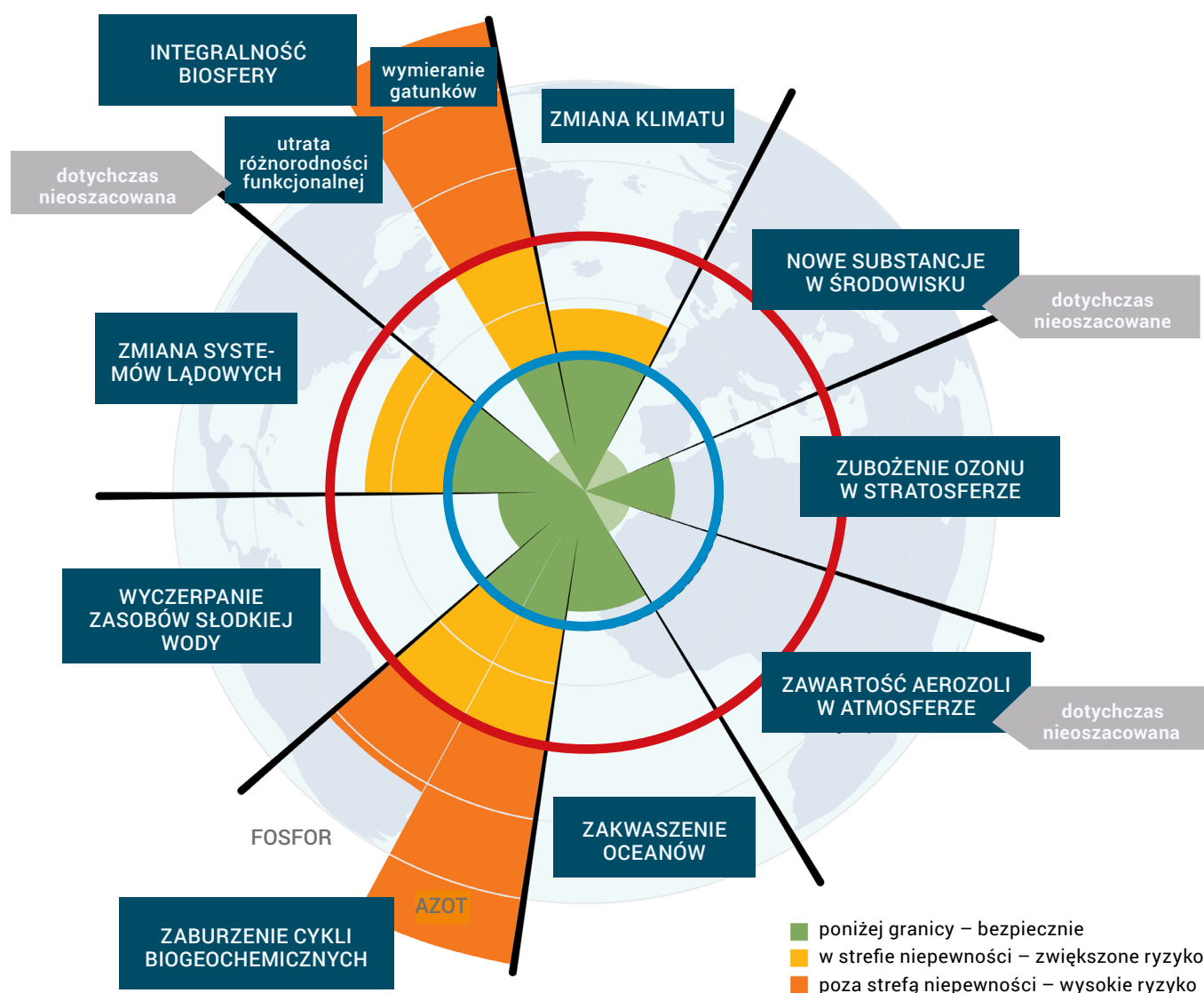
O raporcie *Granice wzrostu* możesz przeczytać też w rozdziale 7.

Koncepcja Granic planetarnych Röckstroma i innych (2009) różni się od podejścia zastosowanego w *Granicach wzrostu* przede wszystkim tym, że analizuje wpływ poszczególnych rodzajów antropopresji 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 dziewięć antropogenicznych procesów ograniczających zdolność naszej planety do zachowania obecnych, pożądanych warunków – holocenijskiego stanu równowagi, który umożliwił ludzkości rozwój przez ostatnie 10 tysięcy lat. Są to:

1. zmiana klimatu,
2. zakwaszenie oceanów,
3. zmniejszanie się warstwy stratosferycznego ozonu,
4. zaburzenia cyklu azotowego i fosforowego,
5. powstawanie antropogenicznych aerozoli (drobnych cząstek) w atmosferze,
6. wyczerpywanie zasobów wody słodkiej,
7. niszczenie ekosystemów lądowych,
8. spadek różnorodności biologicznej,
9. zanieczyszczenia chemiczne i wprowadzanie nowych substancji do środowiska.

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 o wymiarze globalnym. 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 to zmiany o charakterze bardziej liniowym, bez jasno zdefiniowanych punktów krytycznych, co jednak nie znaczy, że są one mniej niebezpieczne. Autorzy tej publikacji stawiają również pytania o to, 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 opublikowanej w 2015 roku (Steffen i in., 2015), a jej wyniki przedstawiono na schemacie (ilustracja 10.4.1.).



Ilustracja 10.4.1. Granice planetarne.

Źródło: Steffen i in., 2015.

Granice planetarne określono z zakresem niepewności, który mieści się pomiędzy niebieskim a czerwonym okręgiem. Zaznaczone na zielono obszary to strefa bezpieczna, na żółto i pomarańczowo – obszary niepewności, a na czerwono te, dla których granice planetarne zostały już przekroczone. Szary kolor oznacza obszary nieoszacowane w 2015 roku w skali globalnej.

Zwróć uwagę, że – jak wynika z tego schematu – **zmiana klimatu** to wcale nie najbardziej naruszona granica planetarna. Jesteśmy pod tym względem wciąż w obszarze niepewności, co oznacza, że mamy jeszcze szansę na uniknięcie jej przekroczenia. Jaka jest sytuacja w innych obszarach?

Najbardziej zaawansowane presje na biosferę, które zdaniem naukowców bezspornie przekroczyły bezpieczne wartości, to **utrata różnorodności biologicznej** oraz **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 – człowiek przyczynia się do niego na wiele sposobów. Wśród nich jest bezpośrednia eksploatacja, jak polowania czy rybołówstwo, ale nie mniej istotne są zmiany w obrębie innych z dziewięciu analizowanych obszarów. W przypadku roślin i owadów najważniejsze jest zanikanie siedlisk spowodowane zamianą 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. Także te, od których bezpośrednio zależy nasze uprawy, ryby, którymi się żywimy, czy wielkie drapieżniki, które odgórnie 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. Zjawisko to zachodzi zarówno na lądzie, jak i w rzekach, jeziorach i morzach. Eutrofizacja ekosystemów lądowych powoduje szybki spadek różnorodności biologicznej roślin, a w jego następstwie również wymieranie owadów i innych grup zwierząt. W ekosystemach wodnych wzrost dostępności azotu i fosforu jest przyczyną zakwitów glonów (w tym toksycznych sinic), czego konsekwencją są deficyty tlenu i powstawanie tzw. martwych stref przydennych w zbiornikach wodnych. Eutrofizacja wód zwiększa też globalne ocieplenie, bo z gromadzących się w nich osadów uwalniają się duże ilości metanu.

Obok zmiany klimatu również stopień zaawansowania **zmian w systemach lądowych** umieszczono w obszarze niepewności, być może zatem jest jeszcze szansa powstrzymania ich degradacji, zanim proces ten osiągnie stopień grożący destabilizacją Ziemi. To w ekosystemach lądowych znajduje się bowiem większość światowej różnorodności biologicznej. One też zawierają ogromną pulę węgla organicznego, decydującą o jego obiegu w przyrodzie. Dziś użytkujemy rolniczo 50% odpowiedniej do zagospodarowania powierzchni lądów, a tempo niszczenia lasów i mokradeł wciąż rośnie.

Trzy „zielone” obszary na analizowanym schemacie nie przekroczyły jeszcze bezpiecznego zakresu zmian. Wśród nich najbliższej niebezpiecznej granicy jest **zakwaszenie oceanów**, będące efektem rozpuszczania się dwutlenku węgla w wodzie morskiej i bezpośrednio powiążane z zawartością dwutlenku węgla w atmosferze. Zakwaszenie oceanów i zmiana klimatu mają nie tylko wspólną przyczynę, procesy te łączy też istnienie punktów krytycznych, po przekroczeniu których zmiany gwałtownie przyspieszają. W przypadku zakwaszenia ten punkt krytyczny to warunki, w których nie mogą funkcjonować koralowce i inne organizmy budujące szkielety z węglanu wapnia, znika więc wtedy ważny biologiczny mechanizm usuwania z wody dwutlenku węgla.

Zaskakiwać może stosunkowo optymistyczne oszacowanie stanu zasobów **wody słodkiej** w skali świata. Choć ich wyczerpywanie się jest w wielu rejonach dotkliwym problemem, okazuje się, że na razie nie jest on na tyle poważny, aby zagrozić destabilizacją przyrody w skali globalnej.

Oznaczenie na schemacie kolorem zielonym **warstwy ozonowej** było możliwe tylko dzięki Protokołowi montrealowskiemu z 1987 roku, który doprowadził do wyeliminowania z rynku niszczących stratosferyczny ozon freonów. Na analogicznym schemacie dla roku 1990 warstwa ozonowa miała kolor czerwony, czyli jej zmiana znacznie przekraczała wówczas granice bezpieczeństwa.

Danych dotyczących granic planetarnych takich presji dla klimatu, jak **aerozole atmosferyczne**, powstające wskutek emisji drobnych pyłów i innych substancji, oraz **nowe substancje w środowisku** w 2015 roku jeszcze nie skompletowano. W ostatnich latach wzrasta liczba prac wskazujących na coraz poważniejsze zaawansowanie zmian spowodowanych przez obce substancje. Zalicza się do nich bardzo różne rodzaje zanieczyszczeń – m.in. antybiotyki wywołujące powszechną antybiotykooporność bakterii, chemiczne środki ochrony roślin, a także genetycznie zmodyfikowane rośliny uprawne, sprzyjające upowszechnianiu się oporności u owadów, oraz obecny już w praktycznie każdym środowisku plastik, którego pełnego wpływu na organizmy wciąż jeszcze dobrze nie znamy.

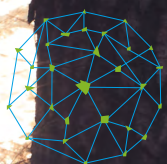


Dla zainteresowanych:

www.anthropocene.info/planetary-boundaries.php

ZAPAMIĘTAJ!

Zmiana klimatu **w tej chwili** jeszcze nie destabilizuje systemu przyrodniczego planety tak silnie, jak inne opisane w tym rozdziale 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 i 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, jest dłuższy niż całe dotychczasowe istnienie naszego gatunku na Ziemi.



**KLIMATYCZNE
ABC**

MAGDALENA BUDZISZEWSKA

ORCID 0000-0002-1837-2086, Uniwersytet Warszawski

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

11. 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 tego rozdziału omawiamy skutki społeczne (nierówności dochodowe i migracje) oraz psychologiczne (samopoczucie, emocje, poziom stresu) tych procesów.

Część zmian społecznych widoczna jest już dziś. Na przykład mieszkańcy Kiribati emigrują, bo ich kraj jest stopniowo wchłaniany przez podnoszące się wody oceanu. Państwa najuboższe, zależne od rolnictwa, szczególnie dotkliwie odczuwają zaburzenia stałych rytmów opadów i zmian pór roku. Ekonomisci, socjologowie, lekarze i specjaliści innych dziedzin starają się przewidzieć, jakich i jak poważnych zmian możemy się jeszcze spodziewać w przyszłości oraz jak wpłyną one na społeczeństwa.

Bardzo ważne jest też określenie sytuacji jednostki, widzimy bowiem, że pełne zagrożenia prognozy mają wpływ na obecną kondycję psychiczną ludzi. Psychologowie badają ten problem już od dłuższego czasu, a największe profesjonalne towarzystwa branżowe opracowały alarmujące raporty. Uświadomienie sobie skali zagrożenia jest mocno stresujące, szczególnie dla osób zaangażowanych w działania na rzecz powstrzymania katastrofy klimatycznej. Dlatego w drugiej części rozdziału wyjaśnimy mechanizm powstawania określonych reakcji psychicznych oraz przekażemy rekomendacje dotyczące radzenia sobie ze stresem. Chociaż były one przygotowane w związku ze zmianą klimatu, mogą się przydać również w innych sytuacjach życiowych.

11.1. 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 o tym pisano w kolejnych raportach IPCC oraz jakie informacje pojawiają się w pracach naukowych na ten temat. W szczególności przyjrzymy się, jaki wpływ ma zmiana klimatu na poziom nierówności dochodowych oraz na skalę międzynarodowych migracji.

Badania ekonomiczne dowodzą, że zmiana klimatu zwiększa nierówności między krajami. W krajach ubogich duża część dochodu narodowego pochodzi z rolnictwa, które jest najbardziej wrażliwe na anomalie pogodowe, takie jak nieregularne opady czy gwałtowne zmiany temperatury. Diffenbaugh i Burke w pracy z 2019 roku wskazują na podstawie analizy danych z lat 1961–2010, że zmiana klimatu obniżyła dochód na osobę w najbiedniejszych krajach o 17–30% (najbardziej w Sudanie, Indiach, Nigerii, Indonezji i Brazylii), podczas gdy kraje bogatsze w analizowanym okresie nie tylko nie ucierpiały, ale wręcz odniosły korzyści ekonomiczne (Norwegia, Kanada, Szwecja, Wielka Brytania i Francja).

Należy jednak zaznaczyć, że w badaniu tym analizowano tylko kilka czynników (średnia temperatura, łączny poziom opadów, czas, w którym zachodziły te zmiany), bez uwzględnienia innych zjawisk, które w przyszłości będą coraz intensywniej występować w wyniku zmiany klimatu: nieregularnych opadów, pożarów, susz, gwałtownych zmian temperatury, wyższego poziomu mórz. Można przypuszczać, że wobec ich nasilania się wraz z upływem czasu także w krajach bogatych zmiana klimatu będzie negatywnie wpływać na ich 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 wskazywał na to zróżnicowanie. Autorzy raportu podkreślali, że społeczno-gospodarcze skutki oddziaływań będą bardziej odczuwalne w tych regionach świata, których społeczeństwa i gospodarki są uzależnione od naturalnych ekosystemów lądowych. Ubogie kraje będą szczególnie zagrożone, ponieważ już teraz rolnictwo, będące w nich główną gałęzią gospodarki, dotkliwie odczuwa skutki coraz bardziej niestabilnej pogody. Z powodu rosnącego poziomu mórz zagrożone jest istnienie krajów wyspiarskich, takich jak Malediwy, Tuvalu i Kiribati, a także osiedli ludzkich położonych w gęsto zaludnionych deltach rzek oraz na obszarach przybrzeżnych (Egipt, Bangladesz, Indie, Chiny, Indonezja). Bogate kraje również będą poszkodowane z powodu rosnącego poziomu oceanów, mają one jednak więcej możliwości, aby się zabezpieczyć (np. budując odpowiednią infrastrukturę). Autorzy wskazują też na niebezpie-



Dla zainteresowanych:
Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century
The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries

www.pnas.org

Global warming has increased global economic inequality

Pierwszy raport IPCC z 1990 roku jest dostępny na stronie www.ipcc.ch

CZY WIESZ, ŻE ?

Bezpośredni dostęp do wielu artykułów naukowych możesz uzyskać, wpisując ich tytuł lub autorów w wyszukiwarce www.scholar.google.pl. Również strony internetowe autorów, uczelni, bibliotek naukowych i wydawców oferują często dostęp do publikacji naukowych.

Dobrze jest nauczyć się korzystać z różnych metod dostępu do oryginalnych tekstów naukowych, bo sprawdzanie źródeł informacji jest bardzo dobrym nawykiem (zwłaszcza teraz, kiedy tak bardzo rozpowszechniają się tzw. fakenewsy).

czeństwo suszy, która może poważnie zaburzyć 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, należy jednak pamiętać, że topnienie wiecznej zmarzliny destabilizuje grunt, utrudnia rozbudowę infrastruktury oraz zagraża istniejącym budynkom.

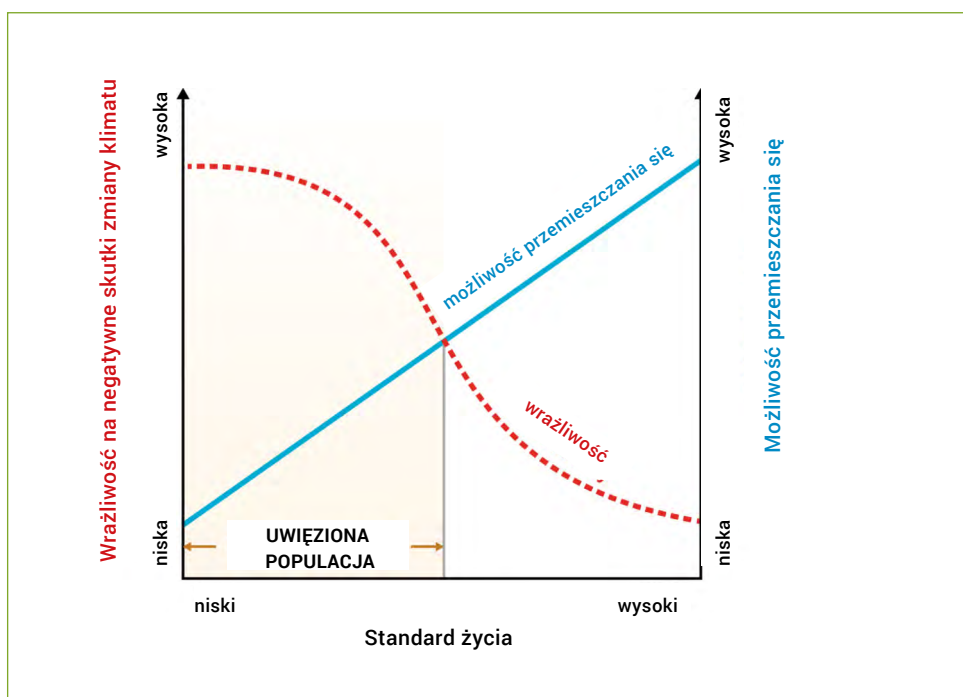
Najpoważniejsze skutki zmiany klimatu mogą być związane z migracją ludności, ponieważ miliony ludzi będą zmuszone do opuszczenia swoich domów w wyniku zalania terenów nadmorskich oraz długotrwałych susz. Wiele krajów, do których ci ludzie będą uciekać, prawdopodobnie nie będzie mogło zagwarantować im opieki zdrowotnej czy innego wsparcia.

We wnioskach końcowych raportu IPCC z 1990 roku czytamy: *Społeczność 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, lecz stale, podczas gdy inne, takie jak przesunięcia stref klimatycznych, które zwiększą częstość takich zdarzeń jak powodzie, susze i gwałtowne sztormy, mogą występować 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 uboższych 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, uzupełniają je jedynie o bardziej szczegółowe informacje.

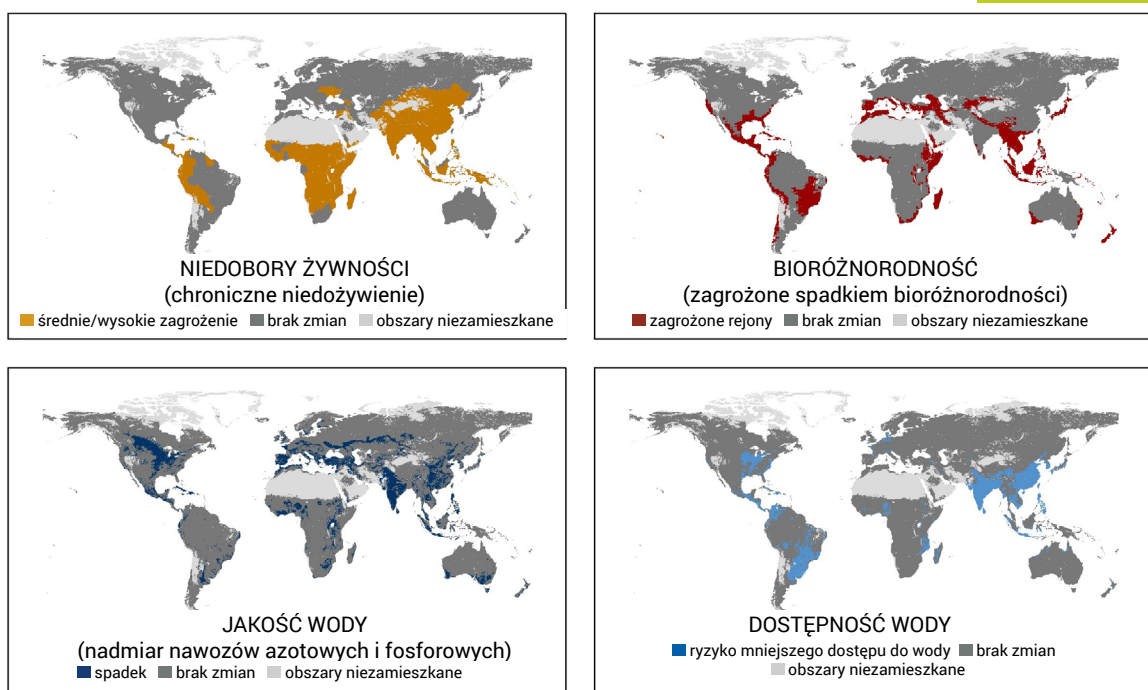
Zmiana klimatu prowadzi nie tylko do zwiększania nierówności między krajami, ale także wewnątrz nich. Raport IPCC z 2014 roku wskazuje, że najubożsi, niezależnie, czy w krajach bogatych czy ubogich, poniosą dysproporcjonalnie wysoki koszt zmiany klimatu. Takie osoby mają mniejsze możliwości radzenia sobie ze szkodami spowodowanymi katastrofami naturalnymi, m.in. dlatego że nie mają oszczędności, są bardziej zagrożone bezrobociem i nie stać ich na ubezpieczenie dobytku. Straty, których będą doświadczać osoby o niskich dochodach, będą więc dotkliwsze niż straty reszty społeczeństwa niezależnie od kraju. Dodatkowo ich możliwości zmiany miejsca zamieszkania są ograniczone. W efekcie wiele osób może się znaleźć w sytuacji bez wyjścia (ilustracja 11.1.1.).



Ilustracja 11.1.1. Zależność między wrażliwością na zmianę klimatu a mobilnością. Jak widać na wykresie, społeczności najbardziej narażone na negatywne skutki zmiany klimatu mogą jednocześnie mieć najmniejsze możliwości migracji.

Źródło: raport IPCC, 2014, WGIIAR5.

Na mapach (ilustracja 11.1.2.) zamieszczonych w raporcie IPCC z 2019 roku (*Climate Change and Land*) przedstawiono wyniki analiz i symulacji prognozujących zmiany, zachodzące w kolejnych dekadach. Wskazano obszary, na których mogą występować szczególnie dotkliwe trudności, oraz rejony zagrożone najpoważniejszymi niedoborami żywności, zanikiem bioróżnorodności czy problemami z dostępnością i jakością wody.



Ilustracja 11.1.2. Obszary, na których w związku ze zmianą klimatu mogą wystąpić: niedobór żywności, zanik bioróżnorodności oraz problemy z jakością i dostępnością wody.

Źródło: IPCC, 2019.

Szczególnie zagrożone, jak widać z tych prognoz, są obszary południowej Azji, gdzie mogą wystąpić jednocześnie problemy z dostępnością wody oraz niedobory żywności.

Analizując oddziaływanie zmiany klimatu pod kątem geograficznym, należy pamiętać, że pogorszy ona sytuację we wszystkich rejonach świata, również tych relatywnie mniej zagrożonych. Zmiany zaburzające proces produkcji żywności oraz ograniczające dostęp do wody słodkiej mogą doprowadzić do znacznego wzrostu cen i w konsekwencji do kryzysów humanitarnych, destabilizacji politycznej oraz konfliktów.



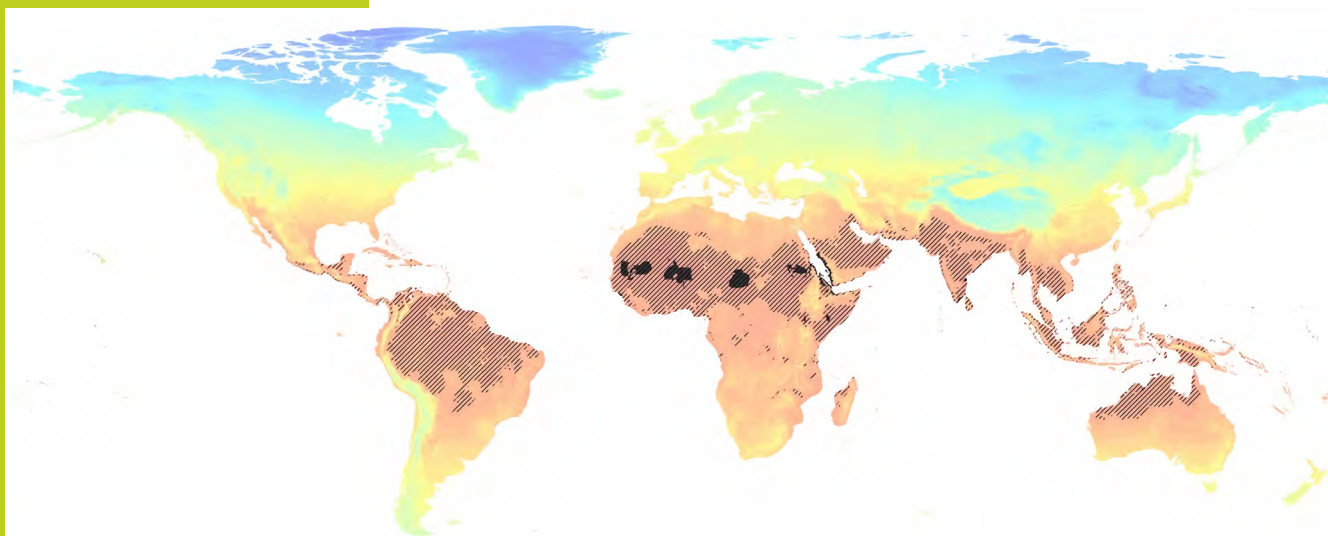
Dla zainteresowanych:

www.santafe.edu

Użyj tytułu: **Study: 'Near-unliveable' heat for one-third of humans within 50 years if greenhouse gas emissions are not cut** i wyszukiwarki tekstów naukowych, aby odnaleźć oryginalny tekst.



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 (ilustracja 11.1.3.). 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.



Średnia roczna temperatura



■ obszar o średniej rocznej temperaturze wyższej niż 29°C – rok 2020

■ obszar o średniej rocznej temperaturze wyższej niż 29°C – rok 2070

Ilustracja 11.1.3. Ekspansja ekstremalnie gorących regionów do roku 2070 w scenariuszu klimatycznym bez ograniczania emisji gazów cieplarnianych (*business-as-usual*).

Źródło: Xu i in, 2020.

Skutki zmiany klimatu rozkładają się – niestety – niesprawiedliwie. Kraje ubogie, które w niewielkim stopniu przyczyniły się do zmiany klimatu, już teraz są bardziej dotknięte negatywnymi konsekwencjami zmian niż kraje bogate. Prognozy wskazują, że te różnice zwiększą się jeszcze 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 obciąży 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 całkiem już niedalekiej przyszłości.



Dla zainteresowanych:
www.nature.com, www.un.org

Country-level social cost of carbon
 Ricke, K., Drouet, L., Caldeira, K. i in.

Global non-linear effect of temperature on economic production.
 Burke, M., Hsiang, S., Miguel, E.

Climate Change and Social Inequality.
 Islam, N., Winkel, J.

Raport migracji opracowany przez
 International Organization for Migration:
www.publications.iom.int/system/files/pdf/migration_and_environment.pdf

Strona przedstawiająca rejony zagrożone brakiem
 dostępu do słodkiej wody:
www.worldwater.io



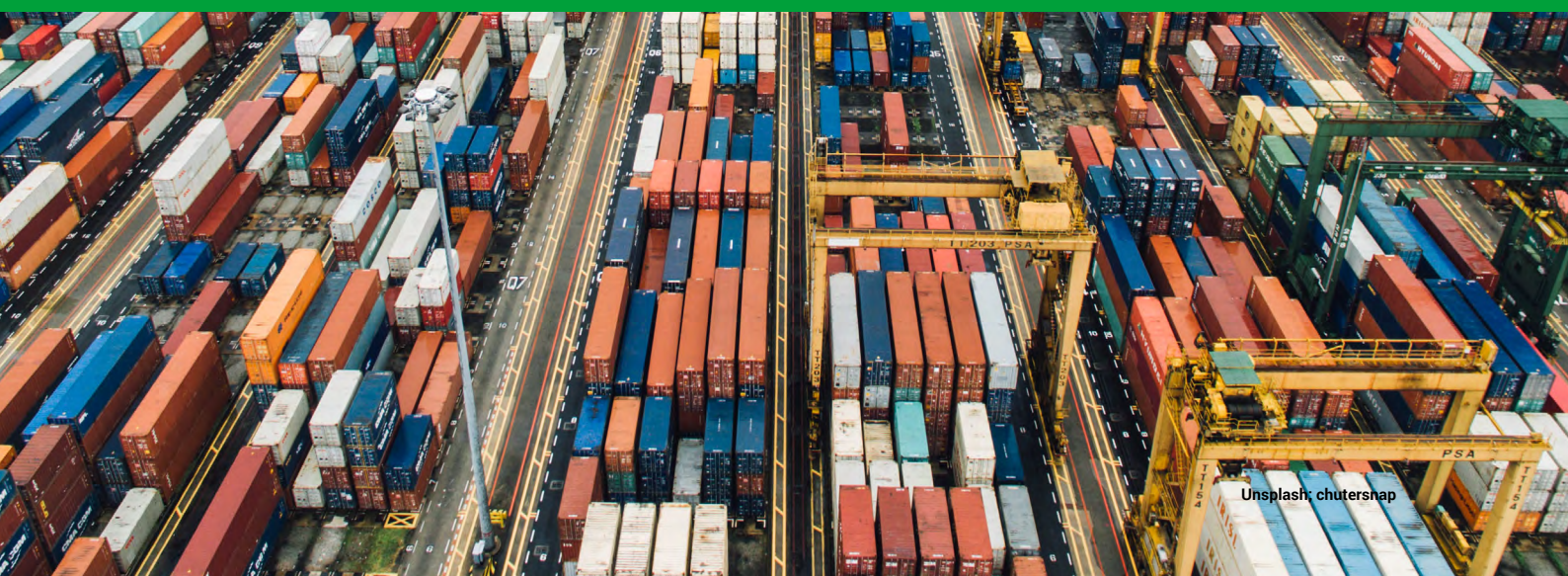
Dla zainteresowanych:
www.ziemianarozdrozu.pl

**ONZ: migrantów klimatycznych nie można
 odsyłać z kraju, do którego przybyli**

**Przemoc i konflikty o wodę w ostatniej
 dekadzie**

<https://smoglab.pl/>

**Migranci klimatyczni. Od września
 aż 10 milionów ludzi musiało opuścić
 swoje domy**



11.2. Psychologiczne konsekwencje zmiany klimatu

Zmiana klimatu już ma i będzie miała coraz poważniejszy wpływ na nasze zdrowie, także psychiczne. Świadomość jej konsekwencji dla życia na Ziemi jest często trudna do udźwignięcia. Psychologiczne strategie radzenia sobie z tą sytuacją są opracowywane przez specjalistów.



Dla zainteresowanych:
www.ecoamerica.org

**Beyond Storms and Droughts:
The Psychological Impacts
of Climate Change**

www.apa.org

**Mental health and our changing
climate: impacts, implications,
and guidance**

**Planetary Boundaries: Exploring
the Safe Operating Space for
Humanity**

**The ecological economics of land
degradation: impacts on eco-
system service values**

<https://digitallibrary.un.org/>

**Climate change and poverty:
Report of the Special Rapporteur
on Extreme Poverty and
Human Rights**

Raporty Banku Światowego są
dostępne pod adresem:
www.worldbank.org

ZMIANA KLIMATU JEST PROBLEMEM LUDZI

Amerykańskie Towarzystwo Psychologiczne opracowało dwa raporty dotyczące psychologicznych konsekwencji globalnego ocieplenia (Clayton, Manning i Hodge, 2014; Clayton, Manning, Krygsman i Speiser, 2017). Mówią one o tym, 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 nasze zdrowie psychiczne.

Jak stwierdzają oba raporty, 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 przy ograniczeniu ocieplenia do 1,5°C, 500 milionów ludzi będzie narażonych na brak dostępu 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 i coraz więcej ludzi doświadczać będzie skrajnego ubóstwa (Alston, 2019). Raporty Banku Światowego mówią, że do 2030 roku zmiana klimatu może wepchnąć w biedę kolejne 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). Mieszkańcy bardziej uprzywilejowanych części świata będą doświadczać poczucia bezsilności, obserwując los tych, których katastrofa klimatyczna dotknie w pierwszej kolejności, a zarazem stwierdzą stopniowe

pogarszanie się własnych warunków życia, mając świadomość, że prognozy dla ich części świata także nie są najlepsze. Utrudni to lub wręcz uniemożliwi wzajemną pomoc.

SKALA BĘDZIE BEZ PRECEDENSU

Takie zjawiska nie są tylko sprawą przyszłości. Już teraz obserwujemy: nasilające się susze, coraz częstsze i coraz poważniejsze pożary, pogarszanie się warunków życia, głód, zwiększanie się ubóstwa i nierówności oraz (dotychczas regionalne) konflikty zbrojne i nasilające się migracje. Po przekroczeniu „bezpiecznego” progu ocieplenia klimatu skala tych zjawisk będzie jednak zupełnie bez precedensu i dotkną one 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 nie są na niego przygotowane.

Dopiero z perspektywy kryzysu klimatycznego jako długoterminowej katastrofy humanitarnej, bez precedensu w historii ludzkości, można zrozumieć ciężar jego konsekwencji psychologicznych.

KONSEKWENCJE PSYCHOLOGICZNE: OSTRE I STOPNIOWE

Autorzy raportów APA podzielili konsekwencje zmian klimatycznych na **ostre** i **stopniowe**. Te pierwsze dotkną osoby i społeczności bezpośrednio doświadczające katastrofami. Do grupy zmian ostrych należą: trauma, szok, ostre zaburzenia związane ze stresem, zespół stresu pourazowego (PTSD). Nagłe straty, takie jak utrata zdrowia, majątku, zatrudnienia, to sytuacje graniczne. W grupach poddanych takim presjom rośnie liczba samobójstw, prawdopodobieństwo przemocy, na ryzyko zniszczenia narażone są więzi społeczne i trwałość instytucji publicznych.

Stopniowe konsekwencje psychologiczne wynikają nie tylko z pogarszania się warunków życia, ale i z antycypacji tych zjawisk oraz ze świadomości zagrożeń wynikających z przekroczenia punktów krytycznych w systemie klimatycznym planety. Zwłaszcza **emocje antycypacyjne** – związane z tym, czego 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 dość odległe i jeszcze niewidoczne. Mówiąc precyzyjniej – zjawisko jest widoczne, ale nie jest ewidentna jego przyszła skala oraz nieliniarny charakter.

Należałoby na nie zareagować, zanim całkowicie wymknie się spod kontroli, ponieważ po przekroczeniu punktów krytycznych może okazać się to niemożliwe. W rzeczywistości im wcześniej na nie zareagujemy, tym większe mamy szanse na złagodzenie jego skutków. Wynika to z masowości zaangażowanych procesów fizycznych oraz ich bezwładności.



Dla zainteresowanych:

World Health Organization, 2018.
COP24 special report:
Health and climate change



Unsplash, Christian-Erfurt



Wiesz już o tym z podrozdziału 1.4. o punktach krytycznych w systemie klimatycznym oraz z podrozdziałów 1.3. i 10.1. o sprzężeniach zwrotnych.

W skali historii planety kilkanaście czy kilkadziesiąt lat to mgnienie oka. Nigdy tak poważne zmiany (np. składu atmosfery) nie zachodziły tak szybko. Dla naszego życia kilkadziesiąt lat to jednak bardzo dużo. **Ewolucyjna historia gatunku ludzkiego przygotowała nas do reagowania na bezpośrednie i nagłe zagrożenia, takie jak atak drapieżników czy pożar.** Instynktowne reakcje walki lub ucieczki, jakie się wtedy włączają, pozwalają ludziom przetrwać i regulować napięcie. Natomiast ciągłe mierzenie się z niewidzialnym i odległym zagrożeniem oznacza długotrwałe kumulowanie w sobie trudnych emocji. Może to prowadzić do wystąpienia takich zaburzeń wynikających z przewlekłego stresu, jak: stany lękowe, depresja, uzależnienia, utrata sensu życia.

Wśród chronicznych konsekwencji zmiany klimatu dla zdrowia psychicznego autorzy raportów APA wymieniają:

- lęk i depresję,
- uzależnienia,
- zwiększoną liczbę samobójstw,
- zwiększone ryzyko agresji i przemocy,
- nadwyrężenie relacji społecznych,
- przewlekły wielowymiarowy stres i jego skutki,
- utratę osobiście ważnych miejsc,
- utratę autonomii i poczucia kontroli,
- utratę tożsamości osobistej i zawodowej,
- poczucie bezradności,
- strach, fatalizm, utratę sensu – lęk ekologiczny.

KLUCZOWE JEST DZIAŁANIE NA POZIOMIE LOKALNYCH SPOŁECZNOŚCI

Psychologowie zwracają także uwagę na konsekwencje nie tylko dla pojedynczych osób, ale i dla całych społeczności. Rekomendują podejmowanie działań przede wszystkim na poziomie lokalnym, przy czym nie tylko rozbudowywanie istniejących, ale i tworzenie nowych systemów przygotowania na kryzys i zapewniania bezpieczeństwa oraz kładących szczególny nacisk na tworzenie więzi społecznych. Wyzwania, jakie będzie pociągać za sobą zmiana klimatu, przekraczają możliwości radzenia sobie z nimi pojedynczych osób. Dlatego kluczowe jest dzisiaj zyskanie umiejętności wzajemnej współpracy (Clayton, Manning i Hodge, 2014; Clayton i in., 2017).



PYTANIA DO REFLEKSJI

Adekwatna odpowiedź na zmianę klimatu musiałaby opierać się na umiejętności korzystania z rozumu i zdolności przewidywania, uwzględniającej prognozy długookresowe i wiedzę naukowców, a nie na instynktownych reakcjach typu walka czy ucieczka. Zastanów się, jakie okoliczności w procesach podejmowania decyzji sprzyjają racjonalności?

Jakie działania – Twoim zdaniem – należałoby podjąć, aby wzmocnić poszczególne osoby w radzeniu sobie z przewlekłym stresem, by prowadził on do konstruktywnego działania, a nie do paraliżujących myśli i paniki?

Jak myślisz, dlaczego psychologowie zwracają większą uwagę na wspólne (na poziomie małych grup i społeczności) niż na indywidualne sposoby przygotowywania się do zagrożeń?

11.3. Co ludzie czują wobec zmiany klimatu?

W tej części rozdziału przyjrzymy się emocjom, jakich powszechnie doświadczają ludzie wobec zmiany klimatu. Takich reakcji jest bardzo dużo, bo każdy człowiek jest nieco inny i różni się od siebie także pod tym względem.



Dla zainteresowanych:
www.psychiatristtimes.com

In the room with climate anxiety



UŚWIADOMIENIE SOBIE SKALI ZMIANY KLIMATU MOŻE BYĆ TRUDNE EMOCJONALNIE

Psychoterapeutka i lekarka zajmująca się zmianą klimatu, Janet Lewis (2018), podkreśla obciążenie emocjonalne, jakie niesie ze sobą wiedza na ten temat. Zwraca ona uwagę, że rozmiar potencjalnej katastrofy i jej konsekwencje przekraczają nasze możliwości wyobraźni i są niezwykle trudne emocjonalnie.

Zaprzeczanie i dystansowanie się. W pewnym sensie zrozumiałą reakcją na tę wiedzę jest więc próba zaprzeczenia realności zmiany klimatu oraz różne formy dystansowania się od niej. Dystansowanie może polegać na odsuwaniu problemu w czasie i przestrzeni (wyobrażamy sobie zmianę klimatu jako dziejącą się nie tutaj i nie teraz, pocieszamy się, że gdzieś indziej będzie gorzej niż u nas). Różne formy zaprzeczania i społecznie uwarunkowanego milczenia (to trudny temat – po co psuć wszystkim humor) są powszechne. O społecznych mechanizmach zaprzeczania zmianie klimatu i dystansowania się od niej mówiliśmy w podrozdziale 5.3. Popularne, zwłaszcza w Internecie, są najrozmaitsze teorie spiskowe, sprzyjające bagatelizowaniu tego problemu.



Dla zainteresowanych:
na platformie YouTube
Kari Norgaard/ Living in Denial



O tym, jak problem zmiany klimatu pojawia się w codziennych rozmowach, opowiada prof. Kari Norgaard. Jej badania pokazują, jak temat ten funkcjonuje w przestrzeni międzyludzkiej i dlaczego tak trudno o tym rozmawiać na co dzień.



Dla zainteresowanych:
wykład Sally Weintrobe
na stronie
www.pschoanalysis.org.uk
Disavowal: Sally Weintrobe and the Psychoanalysis of Climate Change Denial



Różne subtelne formy dystansowania się od problemu zmiany klimatu opisuje w sfilmowanym wywiadzie psychoterapeutka Sally Weintrobe, podkreślając, że taką postawę przyjmuje większość ludzi.

Co jednak dzieje się z tymi, którzy są gotowi dopuścić do siebie trudną wiedzę o zmianie klimatu? Jakich doświadczają emocji?

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 i mieszka za miastem. Zawsze żył blisko przyrody. Od dziecka był z nią związany. Kiedy obserwuje zmianę klimatu na własne oczy, wyschnięty strumień, obumieranie drzew, brak motyli i innych owadów, napętnia go to ogromnym smutkiem. Nie martwi się o siebie, ale o innych. Chorzy w szpitalach, dzieci, najłabsi – ich zmiana klimatu dotknie w pierwszej kolejności. 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.



Opowieści ludzi,
którzy się martwią

SOLASTALGIA – prawdopodobnie jedno z najbardziej filozoficznych określeń emocji klimatycznych zaproponowane przez australijskiego filozofa Glena Albrechta. Stworzył on neologizm łączący łacińskie słowo *solacium*, oznaczające komfort i pocieszenie, z greckim rdzeniem *-algia*, oznaczającym ból lub chorobę. W ten sposób powstało nowe słowo podkreślające, że sytuacja zmiany klimatu jest czymś wyjątkowym, bez precedensu w historii ludzkości. Okazało się bowiem, że dotychczasowe pojęcia przestały wystarczać do opisania uczuć, które powoduje to zjawisko.

DEFINICJA

Solastalgia to rodzaj tęsknoty i żałoby wywołanych 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 zwraca uwagę, 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 dzisiejszych 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 żyjących blisko natury, mieszkających na wsi. Opisano ją też w społecznościach głęboko związanych ze swoją przyrodą i krajobrazem, jak Inuici i inni rdzenni mieszkańcy różnych kontynentów. Stosunkowo najtrudniej jest zauważyć zmiany ludziom żyjącym w miastach i w swojej codzienności oderwanym od przyrody.



Warto posłuchać utworu Ludovico Einaudiego
Einaudi – Elegy for the Arctic

nagranego na specjalnie przygotowanej do tego platformie na Oceanie Arktycznym, dostępnego na kanale YouTube

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.

PYTANIA DO REFLEKSJI

Zastanów się, czy są jakieś różnice we wzorach następowania po sobie pór roku, zjawisk atmosferycznych, w napotykanym przez Ciebie roślinach, owadach, zwierzętach, które zaobserwowałeś w miejscu swojego zamieszkania w czasie Twojego życia lub w ciągu ostatnich kilku lat. Jak myślisz, dlaczego takich rzeczy nie zauważa się na co dzień?

Rozważ, jaką funkcję mogą pełnić emocje w kontekście zmiany klimatu.

FUNKCJE EMOCJI

Przyglądając się emocjom z perspektywy ich funkcji, warto pamiętać, że w zasadzie wszystkie mogą mieć znaczenie adaptacyjne. Strach sygnalizuje zagrożenie, smutek sprzyja wycofaniu energii i daje czas na refleksję, a także zbliża do siebie ludzi. Złość często daje 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. Za zdrowe przyjmujemy tutaj takie reakcje, których funkcja jest adaptacyjna. Ostatecznym probierzem adaptacyjności naszych reakcji wobec zmiany klimatu są ich skutki – czy sprawiają, że zbiorowo, na poziomie społecznym, przejdziemy do sensownego, przemyślanego działania. Posługując się pewną metaforą: jeśli widzimy powódź zbliżającą się do naszej (globalnej) wioski, udawanie, że nie ma powodów do obaw, jest równie nieadaptacyjne, jak pozwolenie sobie na paraliżujący strach.

Istnieją różne reakcje na strach. Można zaprzeczać, że są do niego powody, co sprawdza się w krótkim dystansie czasowym, bo pozwala nam w miarę normalnie funkcjonować. Można jednak spróbować wpłynąć na źródło/przyczynę strachu, co jest o tyle korzystniejsze, że daje szansę na złagodzenie skutków rzeczywistego zagrożenia. W obliczu zmiany klimatu konieczne jest wspólne wypracowanie możliwie dobrego, wykorzystującego wiedzę, rozwiązania. Wymaga to także rozmów na temat wiążących się z tym emocji i znalezienia sposobu na radzenie sobie z nimi indywidualnie i na poziomie zbiorowości.

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 łatwiej poradzić sobie z takimi emocjami, podejmując przemyślane, celowe działania. Podkreślają też bardzo ważną rolę podtrzymywania nadziei. Skoro lęk często wywołuje reakcję zamrożenia (*freezing response*), działanie – zwłaszcza wspólne działanie z innymi, w grupie bliskich osób – może pomóc w jego przełamaniu także na poziomie neurologicznym (Gorman i Gorman, 2017).

Grupami najbardziej narażonymi na trudne emocje związane z klimatem są: specjaliści, osoby dobrze poinformowane i mające do czynienia z natłokiem 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 jednym z badań (Verplanken, Roy, 2013) wykazano, że korelacja między częstym martwieniem się globalnym ociepleniem a skłonnością do generalnego patologicznego martwienia się jest bliska zeru. 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 charakteryzującą się otwartością i gotowością do korzystania z nowych doświadczeń.



Dla zainteresowanych:
www.isthishowyoufeel.com

Smutek klimatyczny. Cunsolo i Ellis (2018) nazwali czasy, w których żyjemy, „czasami wielkiej straty”. Coraz większa liczba osób doświadcza często uczucia utraty ważnych miejsc, tożsamości, sposobów życia, coraz częściej też antycypują oni kolejne podobne przyszłe straty. Dochodzi do tego także utrata pozytywnych oczekiwań wobec przyszłości i perspektywa upadku ekosystemów. Epokę człowieka – antropocen – opisano również jako czas wielkiej samotności (Steffen i in., 2015). Szóste wielkie masowe wymieranie gatunków (Ceballos, Ehrlich i Dirzo, 2017) to sytuacja, w której ludzie przyczyniają się do masowego zaniku różnorodności biologicznej, wymierania kolejnych gatunków i zostają na Ziemi coraz bardziej osamotnieni, 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 i Wakefield, 2007). Doświadczenie smutku związanego z utratą świata przyrody i zmianą klimatu jest ważne, bo daje szansę na głębszą refleksję i podjęcie społecznej rozmowy na ten temat.

Depresja klimatyczna. Osoby, które problem zmiany klimatu dotyka głęboko, często mówią o „depresji klimatycznej”. Takiemu stanowi mogą towarzyszyć utrata sensu życia, nadziei i motywacji do robienia czegokolwiek, irytacja i agresja, bezsenność, wycofanie, unikanie relacji społecznych, nienawiść, życzenie sobie śmierci, myśli 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 jednostką chorobową. Podobnie nie ma „depresji po rozstaniu” czy „depresji po utracie pracy” jako osobnych kategorii diagnostycznych, chociaż poważne straty życiowe uprawniają do zachorowania na depresję. 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 podajemy na s. 222).

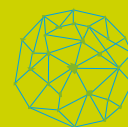
Wiele osób mówiących o depresji klimatycznej nie ma jednak na myśli depresji w sensie medycznym. W języku potocznym często mówi się o depresji jako stanie głębokiego cierpienia, załamania się czy braku nadziei. Można więc uznać, że jest to kryzys egzystencjalny spowodowany poważnym i realnym zagrożeniem cywilizacyjnym, którego skala i znaczenie dopiero zaczynają do ludzi docierać.

Tak jak zwróciliśmy uwagę w części dotyczącej smutku, przeżywanie emocji klimatycznych jest w obliczu naszej obecnej sytuacji i adekwatne, i odważne, bo oznacza gotowość skonfrontowania się z nią zamiast uciekania w zaprzeczanie. Być może nawet przeżywające je osoby, reagujące mocniej niż inni na rzeczywistość taką, jaka jest naprawdę, odgrywają rolę swoistych sygnalistów – pokazują innym coś ważnego, co dzieje się realnie i wymaga skupienia na tym uwagi.

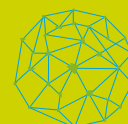
Właśnie dlatego w psychologii klinicznej czy psychoterapii nie postuluje się tworzenia specjalnych kategorii diagnostycznych dla emocjonalnych konsekwencji stresu związanego ze zmianą klimatu. Niosłoby to bowiem ryzyko patologizowania i społecznego unieważniania reakcji emocjonalnych na realny kryzys (Horwitz i Wakefield, 2007).

Żałoba. Dla zrozumienia podłoża emocji związanych ze zmianą klimatu pojęcie żałoby rodzi w pewnym sensie ciekawsze implikacje niż pojęcie depresji. Pojęcie żałoby bowiem, w odróżnieniu od depresji, nie jest równoznaczne z zaburzeniem, ale oznacza naturalną reakcję na bardzo bolesne wydarzenie i stopniowe stawianie czoła trudnościom.

Żałoba jest reakcją na stratę, znaną w wielu kulturach, różnorodną w wyrazie i powszechną. Okres żałoby to okres przejścia emocjonalnego, mentalnego, praktycznego, czasem reorientacji. Uczymy się żyć od nowa w zmienionym kontekście. Rzadko mówi się o stracie, odnosząc się do świata przyrodniczego czy naturalnego – jest to nieuznana, nierozpoznana żałoba (Doka, 1989). Zdaniem współczesnych autorów (Butler, 2004; Head, 2016) taka żałoba ma duży potencjał łączący ludzi, prowadzi do uznania poczucia jedności, współzależności, do otwarcia się na wspólne przeżywanie bolesnych doświadczeń. Może mieć zatem społeczne znaczenie transformacyjne, pomagać ludziom w nawiązywaniu współpracy. W kontekście zmiany klimatu to właśnie gotowość do współpracy może okazać się czynnikiem decydującym o powodzeniu zarówno mitygacji (czyli ograniczania procesów prowadzących do globalnego ocieplenia), jak i adaptacji (czyli przystosowywania się do nadchodzących zmian).



O problemie dóbr wspólnych (publicznych) piszemy w podrozdziale 4.1.



O mitygacji i adaptacji do zmiany klimatu piszemy w rozdziale 13.



11.4. Strategie radzenia sobie ze stresem

Z tego podrozdziału dowiesz się, jakie są praktyczne sposoby radzenia sobie ze stresem i trudnymi emocjami wywołanymi zmianą klimatu.



Dla zainteresowanych:
pełny tekst rekomendacji jest
dostępny na stronie Australijskiego
Towarzystwa Psychologicznego

www.psychology.org.au



OGÓLNE ZALECENIA DLA OSÓB ZMAGAJĄCYCH SIĘ Z PRZEWLEKŁYM STRESEM

Zalecenia, jakich można udzielić osobom zmagającym się z przewlekłym stresem, nie muszą być związane ze zmianą klimatu – sprawdzą się także w przypadku stresu związanego z nauką, pracą, chorobą czy innymi sytuacjami życiowymi.

Podane tu zalecenia zostały opublikowane w 2019 roku przez Australijskie Towarzystwo Psychologiczne. Australia już teraz zмага się z poważnymi konsekwencjami tego zjawiska, które dotyka wielu ludzi.

ZACHOWAJ AKTYWNĄ POSTAWĘ

Długotrwała bierność wobec spraw, które są dla nas ważne, może pozbawiać siły i poczucia sprawczości. Jeśli nawet nie mamy na nie wielkiego wpływu, utrzymywanie aktywności i podejmowanie choćby małych kroków sprzyja zachowaniu dobrej kondycji psychicznej. Dotyczy to w równej mierze codziennych stresorów, takich jak trudny egzamin czy choroba bliskiej osoby, jak i takich makroproblemów społecznych, jak zmiana klimatu.

RÓB PRZERWY I PLANUJ ODPOCZYNEK

Robienie sobie celowych przerw od myślenia o trudnych problemach jest kolejną ważną strategią. Ciągły napływ negatywnych informacji przekazywanych przez tradycyjne media czy media społecznościowe nie rozwiązuje żadnych problemów, a bardzo męczy odbiorcę. Świadome robienie sobie przerw od zajmowania się czymś ważnym to nie to samo, co trwałe wyparcie czy unikanie problemu. Daje szansę na aktywne zarządzanie swoimi zasobami czasu, sił i energii.

KONCENTRUJ SIĘ TYLKO NA KILKU RZECZACH NA RAZ

Nikt nie może zrobić wszystkiego na raz. Warto wybrać to, co chcesz i możesz zrobić, i w to inwestować swoją energię. Świadoma koncentracja na jednym obszarze lub kilku oszczędza siły i chroni przed przeciążeniem.

STOSUJ ZDROWE RUTYNY

Rutyny mają często znakomity wpływ na nasze samopoczucie. Planowanie aktywności i podejmowanie decyzji, co, kiedy, jak i czy w ogóle robimy, jest obciążające. Dzięki rutynom oszczędzamy energię przy podejmowaniu drobnych decyzji, zachowując ją na działanie w sprawach poważniejszych. Rutynowe zachowania mogą dotyczyć: sposobów nauki i pracy, zdrowego



odżywiania, rytmu snu, wysiłku fizycznego i regularnego spędzania czasu na świeżym powietrzu, a także relacji z przyjaciółmi i członkami rodziny. W przewlekłym stresie nie sposób przecenić znaczenia zdrowych nawyków.

KORZYSTAJ Z SIŁY DOBRYCH EMOCJI

Pozytywne doświadczenia są bardzo ważne w motywowaniu siebie i inspirowaniu innych. Kiedy doświadczamy pozytywnych emocji, większe jest prawdopodobieństwo, że będziemy działać skutecznie. Badania dowodzą, że osoby, które doświadczają pozytywnych emocji, łatwiej konfrontują się wprost z zagrożeniami, znajdują oryginalne rozwiązania problemów, są bardziej motywujące dla innych itp. Nawet w trudnych sytuacjach często można znaleźć przestrzeń do spontaniczności, żartów i zabawy, by dzięki temu podtrzymywać pozytywne emocje. Potencjalne rozwiązania makroproblemów społecznych, takich jak te wiążące się ze zmianą klimatu, mają bardzo dużo dobrych stron – warto ich poszukać i o nich mówić.

KORZYSTAJ ZE WSPARCIA SPOŁECZNEGO

Dbaj o dobre relacje z osobami, które rozumieją Twoje troski i mogą Cię wspierać. Nic nie ma tak silnie udowodnionego wpływu na radzenie sobie z długotrwałym stresem, jak wsparcie społeczne (Taylor, 2011). Inni ludzie mogą być źródłem informacji, wzorów radzenia sobie w trudnych sytuacjach, mogą towarzyszyć, wspierać, dostarczać okazji do wyrażania emocji, pomagać nabierać dystansu. Świadomie spędzaj czas z osobami, które Cię wspierają, i we wspierającym otoczeniu, szukaj ludzi, którzy dzielą Twoje troski lub wartości.

POZWALAJ SOBIE NA AKCEPTOWANIE I WYRAŻANIE WSZYSTKICH EMOCJI

Spróbuj nie oceniać swoich emocji, ale pozwól im być. Obserwuj, jak pojawiają się i znikają, próbuj je nazywać. Dbaj o swój organizm i bądź uważny na wszystko, co się pojawia. Relaksacja, medytacja czy zwykłe wygadanie się przyjacielowi potrafią pomóc. Podczas rozmowy ludzie często odkrywają, że inni czują podobnie, i uczą się nowego podchodzenia do problemów.

NIE OCENIAJ ZBYT SUROWO (ANI SIEBIE, ANI INNYCH)

W kontekście klimatu łatwo o poczucie winy i irytację – w końcu nikt nie robi wystarczająco dużo, ani my, ani inni. Podobnie jest w innych trudnych sytuacjach, takich jak choroba kogoś bliskiego: wiele osób obwinia się o to, że nie czyni dla niego wystarczająco wiele. Warto unikać ocen oraz nadmiernego krytycyzmu i rygoryzmu wobec zarówno siebie, jak i innych.

RÓWNOWAŻ DZIAŁANIE Z REFLEKSJĄ I WZAJEMNIE JE PRZEPLATAJ

Ułatwia to odróżnienie rzeczy ważnych od nieważnych, potrzebnych od (akurat) niepotrzebnych, sprzyja rozplanowaniu działań na małe kroki, zapewnia też równowagę między aktywnością a namysłem nad jej ewentualnym skorygowaniem. Docenianie znaczenia małych kroków jest bardzo ważne w działaniu na długi dystans i w przewlekłych sytuacjach obciążenia.

Refleksja pomaga także unikać pułapek i błędów poznawczych, takich jak myślenie czarno-białe i w kategoriach „wszystko albo nic”. W odniesieniu do zmiany klimatu jest to szczególnie ważne.



VACLAV HAVEL

PIELĘGNUJ NADZIEJĘ

Nadzieja w kontekście nieznanej przyszłości może być różnie rozumiana, ale jest często ludziom ogromnie potrzebna. Może pomagać w trwaniu przy wyznawanych wartościach, dodawać odwagi i siły koniecznej do utrzymywania 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.*

DBAJ O ODPOCZYNEK PSYCHICZNY I KORZYSTAJ Z KONTAKTU Z NATURĄ

Ludzie w trudnych sytuacjach są zdolni do wytrzymania nawet wielkiego wysiłku, skupienia, skoncentrowanej uwagi (Kaplan, Berman, 2010). U osób bardzo zmęczonych psychicznie, na przykład z powodu konieczności utrzymywania długotrwałej koncentracji, może jednak dojść do wyczerpania zasobów energii czy siły woli. Dlatego warto dbać o regularne uzupełnianie zasobów uwagi, podejmując czynności i przebywając w środowisku ułatwiającym regenerację psychiczną. Mogą to być: praca w ogrodzie, spacer po lesie czy każda inna aktywność na świeżym powietrzu, patrzenie się w chmury, ogień lub inne przyjemne dla oka obiekty i miejsca, niewymagające wiele uwagi, przebywanie w naturalnym środowisku czy kontakt ze zwierzętami. Relaks, zabawa, sport pomagają odbudować się wewnątrz. Człowiek jest częścią przyrody i naturalnego świata. Dbanie o dobrostan całego złożonego świata naturalnego może i musi oznaczać dbanie także o własną kondycję psychiczną i fizyczną. Nie sposób być konstruktywnym dla otoczenia, będąc jednocześnie destruktywnym wobec samego siebie.

RELACJA CZŁOWIEK – PRZYRODA

Specjaliści w dziedzinie psychologii ekologicznej (Roszak, 1992) stawiają tezę, że człowieka i przyrodę łączy głęboka, choć częściowo nieświadoma więź wynikająca z naszej historii ewolucyjnej i trybu życia naszych przodków. Człowiek jest częścią przyrody i jest z nią powiązany na wiele sposobów siecią najrozmaitszych współzależności. Szkodząc przyrodzie, szkodzi samemu sobie. To poczucie więzi zostało jednak stłumione przez nowoczesną cywilizację, czego skutkiem jest degradacja przyrody. Zastanów się i spróbuj odpowiedzieć na pytanie, czy zgadzasz się z tą myślą; uzasadnij swoją odpowiedź.

Podobny pogląd znany jest w psychologii pod nazwą **biofilii**. Zgodnie z tą hipotezą ludzie szukają kontaktu ze światem żywych istot i mają instynktowne, wrodzone poczucie bliskości z naturą – zwłaszcza wtedy, gdy nie niesie to ze sobą żadnego zagrożenia: większość z nas odbiera jako przyjemne i uspokajające miejsca pełne zieleni czy znajdujące się nad wodą. Mamy też poczucie pokrewieństwa w stosunku do wielu gatunków zwierząt (Wilson, 2017). Dobroczynny wpływ przyrody polega na redukcji stresu psychologicznego, odbudowywaniu zasobów uwagi, wywoływaniu przyjemności i poprawianiu skuteczności programów terapeutycznych (Scott i in., 2015).

IV. O ROZWIĄZANIACH



KLIMATYCZNE
ABC

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA KARDAŚ

ORCID 0000-0002-8257-9997, Uniwersytet Warszawski

PAWEŁ GAJDA

ORCID 0000-0002-6415-3298, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

JAKUB JĘDRĄK

ORCID 0000-0001-7192-628X, Polska Akademia Nauk

SZYMON MALINOWSKI

ORCID 0000-0003-4987-7017, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

ORCID 0000-0001-7252-4581, Uniwersytet Warszawski

ADAM RAJEWSKI

ORCID 0000-0003-1998-1462, Politechnika Warszawska

12. Jak przeciwdziałać kryzysowi klimatycznemu?

Scenariusze ograniczania emisji i energetyka

Ostatnie rozdziały tego podręcznika poświęcone są rozwiązaniom mogącym ograniczyć zmianę klimatu. Zwracamy w nim uwagę na działania pomagające w adaptacji, ponieważ **mitygacja** zmiany klimatu (jej ograniczanie) i **adaptacja** (przystosowywanie się do niej) często są ze sobą powiązane. Istnieją jednak pewne granice, które ostatecznie uniemożliwiają przystosowanie się do zmiany bez jej ograniczenia.

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 poruszamy wątek energetyki, która jest kluczowym (choć nie jedynym) sektorem wymagającym całkowitej przemiany. Potrzeba transformacji energetycznej jest pilna, ale – jak zobaczysz – nie jest to sprawą prostą i wymaga planowania. Pod koniec tego rozdziału zwrócimy uwagę na ważny w Polsce, często mylony ze zmianą klimatu, problem jakości powietrza, czyli smogu. Wiele rozwiązań proponowanych w tej kwestii 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

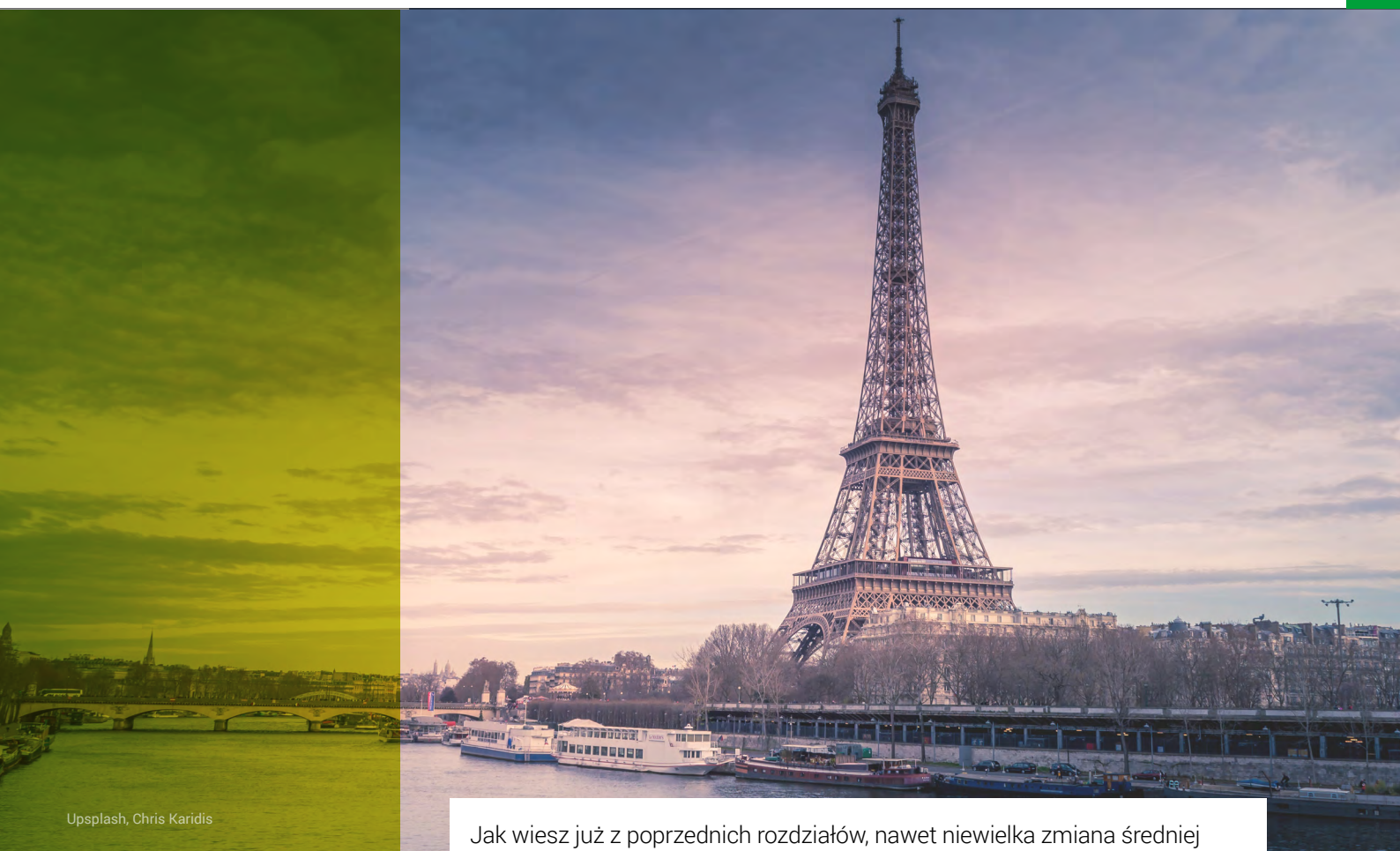
– wszelkie działania mające na celu przystosowanie społeczeństwa i infrastruktury do skutków zmiany klimatu oraz minimalizację negatywnych konsekwencji tego zjawiska.

ZBIGNIEW BOHDANOWICZORCID 0000-0002-5430-0485
Uniwersytet Warszawski**ALEKSANDRA KARDAŚ**ORCID 0000-0002-8257-9997
Uniwersytet Warszawski**SZYMON MALINOWSKI**

ORCID 0000-0003-4987-7017

12.1. 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.



Upsplash, Chris Karidis

Jak wiesz już z poprzednich rozdziałów, nawet niewielka zmiana średniej temperatury powierzchni Ziemi znacząco wpływa na funkcjonowanie przyrody oraz na życie człowieka. Nie jest możliwe jednoznaczne określenie bezpiecznego zakresu zmian. Poszczególne zjawiska stają się poważne, zagrażając 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 właśnie cel został zarysowany w **Porozumieniu paryskim** uchwalonym w 2015 roku podczas konferencji Narodów Zjednoczonych.

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 zmianę 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 zmiany klimatu, przewidziane w Konwencji, [...]

PRZYNAJĄC, że zmiana klimatu stanowi wspólny problem ludzkości [...]

UZGODNIŁY, CO NASTĘPUJE: [...]

Wzmacniając wdrażanie Konwencji, w tym jej celu, niniejsze Porozumienie dąży do intensyfikacji globalnej odpowiedzi na zagrożenie związane ze zmianą klimatu, w kontekście zrównoważonego rozwoju i wysiłków na rzecz likwidacji ubóstwa, między innymi poprzez:

- a) ograniczenie wzrostu średniej temperatury globalnej do poziomu znacznie niższego niż 2°C powyżej poziomu przedindustrialnego oraz podejmowanie wysiłków mających na celu ograniczenie wzrostu temperatury do 1,5°C powyżej poziomu przedindustrialnego, uznając, że to znacząco zmniejszy ryzyka związane ze zmianą klimatu i ich skutki;
- b) zwiększenie zdolności adaptacji do negatywnych skutków zmiany klimatu oraz wspieranie odporności na zmianę klimatu i rozwoju związanego z niską emisją gazów cieplarnianych w sposób niezagrażający produkcji żywności; oraz
- c) zapewnienie spójności przepływów finansowych ze ścieżką prowadzącą do niskiego poziomu emisji gazów cieplarnianych i rozwoju odpornego na zmianę klimatu.

Źródło: Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej



UW; Mirosław Kaźmierczak

Jak widzisz, decydenci zdecydowali się na określenie konkretnego progu, którego nie powinna według nich przekroczyć średnia temperatura powierzchni Ziemi. Początkowo miał on wynosić 2°C, zwrócono jednak uwagę, że taki próg jest nieakceptowalny dla licznych krajów wyspiarskich i nisko położonych, których tereny zostałyby w takim przypadku zalane w wyniku wzrostu poziomu morza.

Międzyrządowy Zespół
ds. Zmiany Klimatu – w skrócie
IPCC, od angielskiego *Intergovern-
mental Panel on Climate Change*.



Dla zainteresowanych:
o celach zrównoważonego
rozwoju ONZ przeczytasz
na stronie

www.un.org.pl

a na stronie
www.ipcc.ch/sr15

znajdziesz oryginalną wersję
specjalnego raportu

Skrócona wersja polska
tego raportu dostępna
jest na stronie

www.naukaoklimacie.pl

**Streszczenie specjalnego
raportu IPCC dotyczącego
globalnego ocieplenia
klimatu o 1,5°C**



Po podpisaniu porozumienia decydenci zwrócili się do Międzyrządowego Zespołu ds. 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 między światem cieplejszym o 1,5°C oraz 2°C od średniej przedindustrialnej jest istotna, biorąc pod uwagę bezpieczeństwo 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 jednocześnie sprzyjają (lub zagrażają) realizacji celów zrównoważonego rozwoju ONZ, takich jak ograniczanie głodu i ubóstwa czy zmniejszanie nierówności.

Po przeanalizowaniu dostępnych wyników badań specjaliści przedstawili w 2018 roku „**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 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 zwiększy się wtedy ryzyko przekroczenia punktów krytycznych wielu zjawisk,
- ograniczenie wzrostu temperatury do tego poziomu w chwili publikacji raportu 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 powrót poniżej tych progów po ich krótkotrwałym przekroczeniu. Jak już wiesz z poprzednich rozdziałów, system klimatyczny jest bardzo skomplikowany i obejmuje wiele wzajemnie powiązanych zjawisk, także mających charakter sprzężeń zwrotnych. Dlatego nie jest możliwe określenie ze stuprocentową pewnością, jakie będą dokładne konsekwencje poszczególnych scenariuszy. W raporcie omówiono więc te, które pozwoliłyby na realizację wspomnianych 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 CO₂ muszą do roku 2050±5 spaść wypadkowo (netto) do zera. W drugiej połowie XXI wieku antropogeniczne emisje tego gazu powinny zaś przybrać wartości ujemne. Oznacza to konieczność wdrożenia na dużą skalę rozwiązań technicznych oraz polegających na wspomaganiu procesów naturalnych, które usuwałyby dwutlenek węgla z atmosfery. Spadkowi emisji dwutlenku węgla towarzyszyć musiałyby także spadki emisji innych gazów cieplarnianych oraz sadzy.

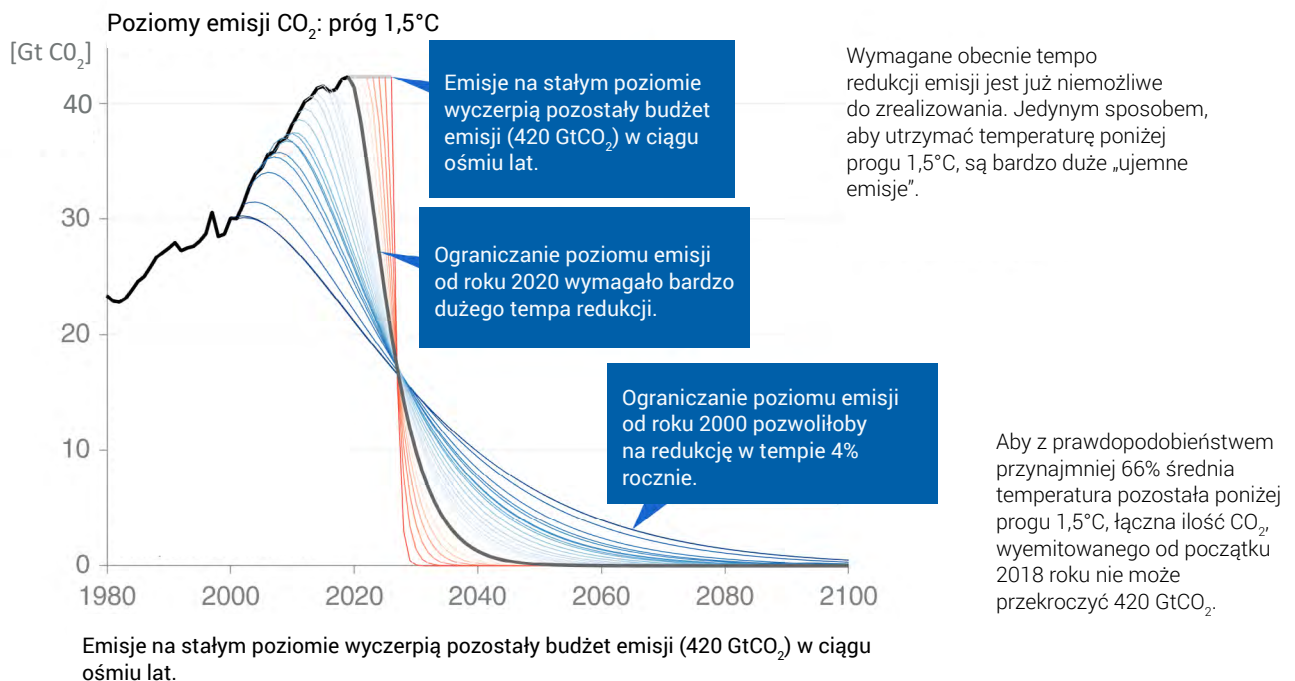
EMISJE ANTROPOGENICZNE NETTO (WYPADKOWE) – różnica między ilością substancji emitowanej a usuwanej z atmosfery w wyniku działalności człowieka.

DEFINICJA

EMISJE UJEMNE – określenie potoczne oznaczające usuwanie substancji z atmosfery.

DEFINICJA

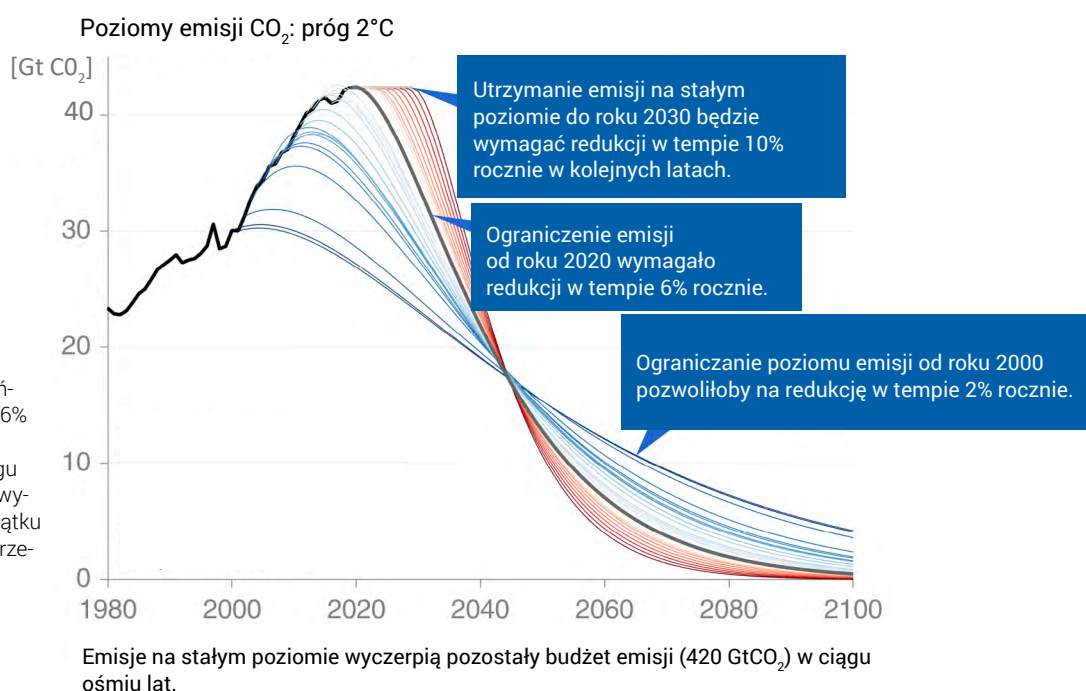
Im później rozpocznie się redukcja emisji, tym szybsze musi być jej tempo (ilustracje 12.1.1. i 12.1.2.). Według szacunków IPCC, aby z prawdopodobieństwem przynajmniej 66% nie przekroczyć progu 1,5°C, od początku roku 2020 możemy w sumie wyemitować już tylko niecałe 350 GtCO₂ (lub mniej, jeśli nastąpią 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) .



Ilustracja 12.1.1. 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: Krzywe poziomów emisji na podstawie Raupach i in., 2014; grafika Andrew, 2017.

Aby z prawdopodobieństwem przynajmniej 66% średnia temperatura pozostała poniżej progu 2°C, łączna ilość CO₂, wyemitowanego od początku 2018 roku, nie może przekroczyć 1170 GtCO₂.



Ilustracja 12.1.2. 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 zaczęłyby się później.

Źródło: Krzywe poziomów emisji na podstawie Raupach i in., 2014; grafika Andrew, 2017.

INŻYNIERIA KLIMATYCZNA (GEOINŻYNIERIA)

Inżynieria klimatyczna to opracowywanie rozwiązań, które mogłyby pomóc świadomie wpływać na klimat poprzez:

- **ograniczanie ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi** (metody SRM – *Solar Radiation Management*),
- **wychwytywanie dwutlenku węgla z powietrza** – zarówno przez odpowiednie instalacje, jak i wspomaganie naturalnych procesów, na przykład wietrzenia skał lub wzrostu glonów (metody CDR – *Carbon Dioxide Removal*).

Większość tego typu rozwiązań nie jest na razie gotowa do wykorzystania na masową skalę – wymagają dokładnego zbadania skutków ich stosowania, a także rozwoju technologii, aby były technicznie wykonalne i ekonomicznie opłacalne.

Jak podkreślono w raporcie IPCC, metody SRM niosą ze sobą poważne zagrożenia dla ludzi i środowiska, nie rozwiązują trwale problemów wynikających ze wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych (takich jak zakwaszanie oceanów) i pociągają za sobą poważne problemy natury organizacyjnej i etycznej. Dlatego nie uwzględniono ich w scenariuszach działań pozwalających na ograniczenie zmiany klimatu.

Natomiast wykorzystanie metod CDR jest obecnie nieodzwonne do realizacji celów Porozumienia paryskiego.

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 poziomu państw i wielkich przedsiębiorstw po style życia poszczególnych obywateli. Do najważniejszych należeć będą:

- **dekarbonizacja energetyki** – jak wiesz już z rozdziału 3., 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 emitowanych przez takie elektrownie;
- **obniżenie emisji CO₂ z przemysłu o 75–90%** – m.in. dzięki poprawie efektywności energetycznej stosowanych obecnie procesów, użyciu wodoru, elektryfikacji, wychwytwi CO₂ ze spalin;
- **poprawa efektywności energetycznej 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 r.).**

Wymienione w ostatnim punkcie zmiany użytkowania terenu to jeden ze sposobów na uzyskanie niezbędnych ujemnych emisji CO₂.

Zmiany w użytkowaniu terenu to jeden z elementów scenariuszy działań pozwalających na ograniczenie zmiany klimatu. Rozwiązania z tej dziedziny nie zastąpią jednak rezygnacji z wykorzystania paliw kopalnych.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Unsplash: Dave

W kolejnych podrozdziałach przeczytasz o różnych scenariuszach rozwoju energetyki, a także o tym, jaką rolę w ograniczaniu zmiany klimatu mogą odegrać gospodarka leśna, rolnictwo oraz ochrona i renaturyzacja ekosystemów. Przedstawimy też instrumenty ekonomiczne sprzyjające dekarbonizacji i przystosowywaniu się ludzkości do życia w nowych warunkach klimatycznych. Są to elementy układanki, która mogłaby pomóc w spełnieniu postanowienia Porozumienia paryskiego.

Niestety, jak być może pamiętasz z rozdziału 4., dotychczasowe działania poszczególnych państw (wdrożone i planowane) nie wystarczą do realizacji scenariuszy opisanych przez IPCC. Według prognoz umożliwią one ograniczenie ocieplenia do ponad 3°C, a nie 1,5°C lub 2°C, względem epoki przedprzemysłowej. Z każdym rokiem różnica między faktycznymi emisjami a tym, ile powinny one wynosić, gdybyśmy chcieli wypełnić postanowienia Porozumienia paryskiego, rośnie (UNEP, 2019).

Dekarbonizacja – rezygnacja ze spalania paliw kopalnych.

PAWEŁ GAJDA

ORCID 0000-0002-6415-3298,
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

ADAM RAJEWSKI

ORCID 0000-0003-1998-1462
Politechnika Warszawska

12.2. Transformacja sektora energetycznego

Energetyka to jeden z kluczowych sektorów gospodarki, który jest zarazem jednym z głównych źródeł emisji dwutlenku węgla. Dlatego musi on przejść znaczącą transformację. Składane deklaracje wprowadzenia daleko idących zmian i podejmowane próby dekarbonizacji gospodarki dotychczas nie przyniosły jednak znaczącej redukcji emisji CO₂ w skali świata, przyczyniając się zaledwie do pewnego spowolnienia tempa ich wzrostu.

ZMIANY W ENERGETYCE – O CZYM TRZEBA PAMIĘTAĆ?

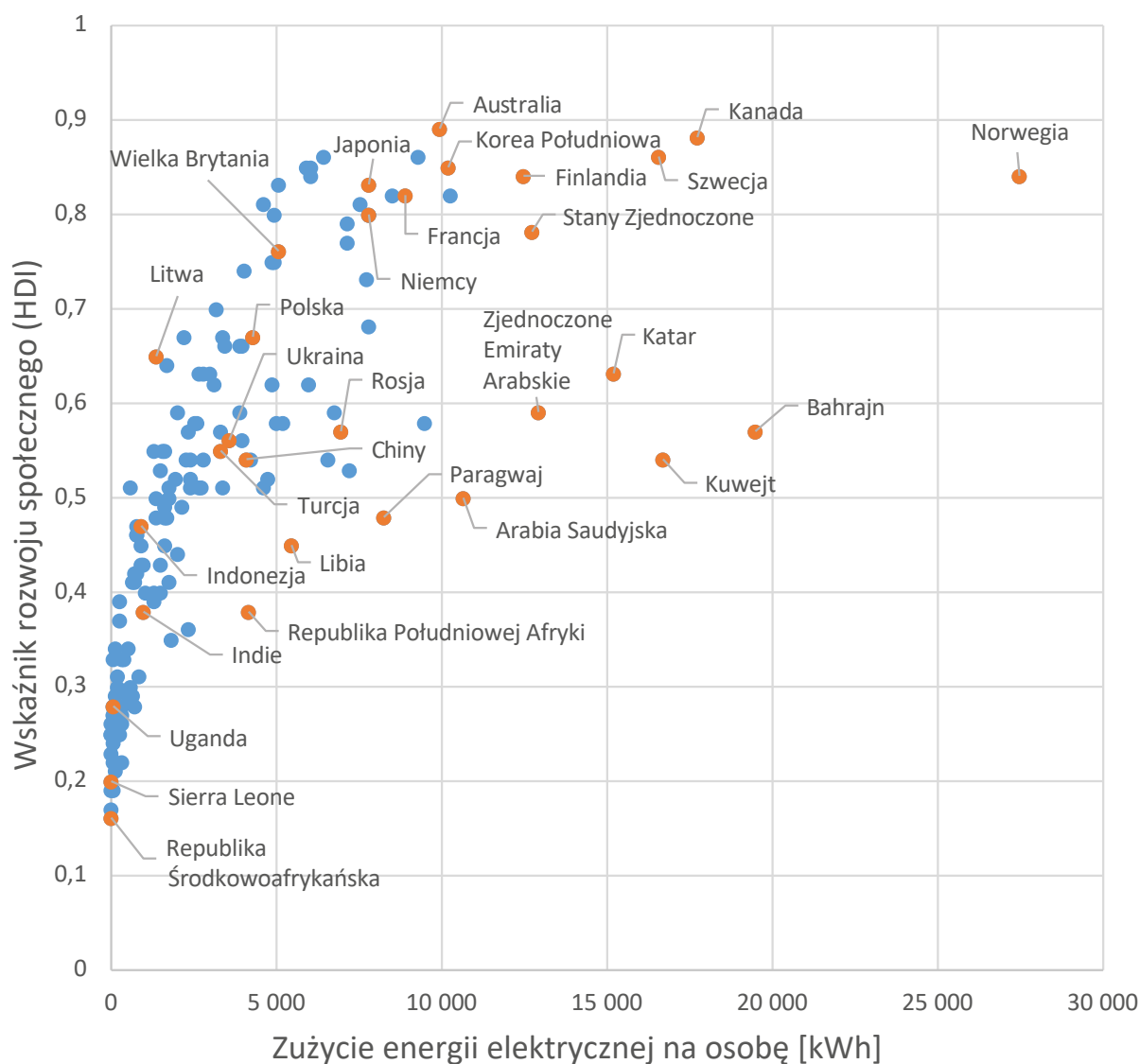
Jak wiesz już z rozdziału 3., procesy związane z zaspokajaniem potrzeb energetycznych ludzkości, przede wszystkim wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła użytkowego, są jednym z głównych źródeł antropogenicznej emisji gazów cieplarnianych. W 2017 roku było to 13,6 mld ton CO₂ (Międzynarodowa Agencja 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 wystąpił w roku 2009 w związku z kryzysem gospodarczym; suma emisji w roku 2018 była o 76% wyższa niż w roku 1990 (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2020). Kolejny istotny spadek emisji pojawił się w roku 2020 z powodu ograniczeń wywołanych pandemią COVID-19. W chwili pisania tego tekstu trudno ocenić jego charakter, warto jednak wspomnieć, że poprzedni istotny spadek, wywołany kryzysem gospodarczym w latach 2008–2009, okazał się przejściowy.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Nie ulega wątpliwości, że dla mitygacji rozmiarów i skutków katastrofy klimatycznej energetyka niemal na całym świecie musi przejść głęboką transformację. Przy dyskusji o transformacji systemów energetycznych (zwanej też transformacją energetyczną) bardzo ważne jest zrozumienie pewnych uwarunkowań zarówno technicznych, jak i historycznych.

Współczesna cywilizacja potrzebuje energii

Jak pisaliśmy w rozdziale 3., energetyka jest jedną z najważniejszych branż umożliwiających rozwój gospodarki i ludzkiej cywilizacji. Wiele prac wskazuje na zależność między produktem krajowym brutto (PKB) – zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym – a zużyciem energii, w tym szczególnie elektrycznej. Jakkolwiek ta 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 (ilustracja 12.2.1.).



Zakłócenia dostaw energii elektrycznej mogą być zagrożeniem nie tylko dla szeroko rozumianego rozwoju gospodarczego i cywilizacyjnego, ale także bezpośrednio dla ludzkiego zdrowia i życia. Oczywiście jest, że bardzo dużo urządzeń wykorzystywanych do ratowania życia wymaga zasilania energią elektryczną. Dlatego zapewnienie niezawodnego zasilania placówek służby zdrowia w energię jest sprawą niezwykle istotną. Z tego powodu są one wyposażane we własne awaryjne układy wytwarzania energii elektrycznej, które pozwalają im na przetrwanie nawet kilkudniowych przerw w dostawie prądu. 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 spowodowanych utratą zasilania (np. ciemności i przerw 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 i w dostępie do Internetu) (Anderson i Bell, 2020). Zmiany w funkcjonowaniu wielkiego miasta w wyniku awarii elektrycznej przedstawia zdjęcie jednej z ulic Nowego Jorku z 15 sierpnia 2003 roku (ilustracja 12.2.2.).

Ilustracja 12.2.1. Zależność między wskaźnikiem rozwoju społecznego (Human Development Index, HDI) a zużyciem energii elektrycznej na osobę. Jak widać na wykresie, nie ma praktycznie kraju o wysokim HDI i niskim zużyciu energii; dane dla 2015 roku.

Źródło danych: BP, 2021; Prados de la Escosura, 2021.

Ilustracja 12.2.2. Ulice Nowego Jorku podczas blackoutu w 2003 roku. Na wysoko rozwiniętych obszarach, gdzie elektryczność uważa się za coś oczywistego, takie nagłe zdarzenie nie tylko dezorganizuje codzienne zajęcia, lecz także stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia i życia. W Nowym Jorku pociągnęło za sobą 90 nadmiernych zgonów, niemal podwajając liczbę zgonów odnotowaną wówczas w tym mieście (Anderson i Bell, 2020).



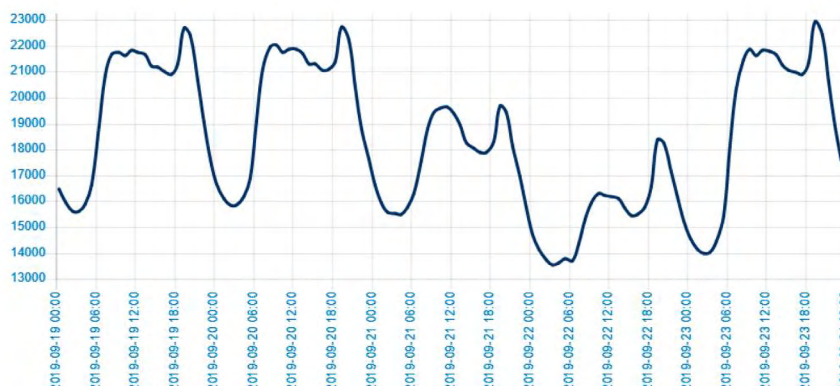
Energię trudno jest magazynować

Jednym z głównych zadań energetyki jako branży jest zapewnianie maksymalnej pewności zasilania, czyli możliwości wyprodukowania oraz dostarczenia energii do każdego odbiorcy. Energetyka składa się więc z trzech zasadniczych elementów: mocy wytwórczych, których zadaniem jest wytworzenie energii i zapewnienie bilansowania systemu; sieci przesyłowych, których zadaniem jest przesyłanie energii od wytwórców do skupisk odbiorców; 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. Zarazem jednak zużycie energii elektrycznej zmienia się zarówno w cyklach dobowych, jak i sezonowych w związku z cyklami pracy gospodarki i trybem życia ludzi (ilustracja 12.2.3.). Oznacza to, że elektrownie dostarczające energię do systemu – przynajmniej niektóre – muszą dostosowywać swoją moc do aktualnego zapotrzebowania. Tradycyjnie funkcję taką pełni wąska grupa wyspecjalizowanych dużych elektrowni, które dysponują odpowiednimi układami technicznymi do realizacji bilansowania i regulacji systemu elektroenergetycznego. Nad całością procesu czuwają też wyznaczone organizacje – operatorzy systemów przesyłowych.

Ilustracja 12.2.3. 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.

Na podstawie: PSE S.A., 2020.



Jakkolwiek w samej sieci magazynowanie energii nie jest możliwe, istnieją pewne techniczne rozwiązania pozwalające na gromadzenie jej poza siecią, są one jednak ograniczone. Wszystkie bowiem polegają na zamianie energii elektrycznej na inną formę energii, a następnie na ponownym wytworzeniu elektryczności. Obecnie 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, kiedy zachodzi taka potrzeba. Jest to technologia dojrzała, ale możliwości budowy takich obiektów są silnie uwarunkowane geograficznie. Istnieją także inne technologie, jednak ich znaczenie obecnie jest stosunkowo niewielkie. Szczególnie dynamicznie rozwijają się ostatnio układy oparte na akumulatorach elektrochemicznych (popularnie zwanych „bateriami”). Niestety ani obecne, ani nawet prognozowane moce i pojemności takich magazynów nie wystarczają, aby myśleć o nich jako o rozwiązaniu problemu długoterminowego magazynowania znaczących ilości energii w skali dni i tygodni. Mogą one jednak być bardzo użyteczne do krótkoterminowego stabilizowania pracy systemu. Przedmiotem intensywnych prac badawczych są także inne koncepcje, zwłaszcza 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 w tradycyjnej instalacji energetycznej w innym czasie. Niestety, jak dotąd, są to technologie niedopracowane. Jedną z ich najpoważniejszych słabości jest niska sprawność takiego procesu, rozumiana jako stosunek energii elektrycznej zwróconej do systemu wobec energii uprzednio z niego pobranej. Nawet przyjmując najbardziej optymistyczne szacunki sprawności tych procesów, do systemu wracałaby w przybliżeniu jedna trzecia zmagazynowanej w ten sposób energii elektrycznej.

Niewielkie możliwości magazynowania energii na dużą skalę stanowią ogromne utrudnienie dla układów wytwarzania i dystrybucji energii, a zwłaszcza dla jej sterowania. W krajach wysoko rozwiniętych działają one jednak z bardzo wysoką niezawodnością i przypadki dłuższych przerw w zasilaniu na większym obszarze zdarzają się bardzo rzadko. Jest to efekt wielu dekad rozwoju branży, który doprowadził do powstania krajowych i międzynarodowych zintegrowanych systemów energetycznych wraz ze skomplikowanymi systemami sterowania i bilansowania, a także spójnym otoczeniem prawno-regulacyjnym.



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, zapewnienia finansowania i wreszcie przeprowadzenia budowy czy instalacji – każdy z tych etapów zajmować może miesiące lub lata. Część procesów, związanych na przykład z otoczeniem prawnoregulacyjnym 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 lub dekad, nawet przy dużej determinacji osób odpowiedzialnych za politykę państwa w tej kwestii.

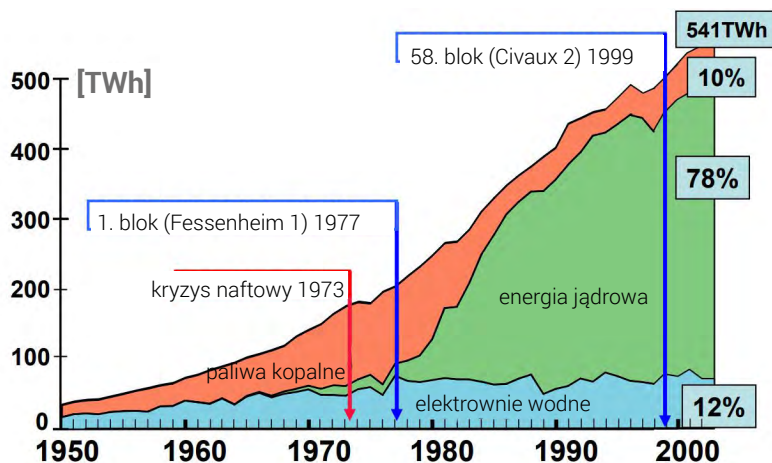
PRZYKŁAD

Jednym z najszerzej zakrojonych całościowych planów szybkiej transformacji energetyki uprzemysłowionego kraju był tzw. **Plan Messmera**, czyli francuski strategiczny program zastępowania energetyki opartej na paliwach kopalnych energetyką jądrową.

Został on wdrożony jako skutek kryzysu naftowego, a jego głównym celem było zmniejszenie zależności Francji od importu surowców energetycznych. Plan ogłoszony w 1973 roku doprowadził w drugiej połowie lat 80. do wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych z około 100 TWh rocznie do około 50 TWh rocznie, i na tym poziomie utrzymuje się do dzisiaj, oraz – co nie mniej istotne – do pokrycia całego znaczącego przyrostu zapotrzebowania (ilustracja 12.2.4.). 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. Jego realizacja była o tyle łatwiejsza, że charakterystyka pracy bloków jądrowych z systemowego punktu widzenia jest całkiem podobna do charakterystyki elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne (szczególnie takie, jakie istniały w tamtym okresie), a także to, że nie brakowało dopracowanych już technologii.

Ilustracja 12.2.4. Ogłoszony w 1973 roku Plan Messmera pozwolił Francji na zredukowanie w ciągu półtorej dekady wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych do stałego poziomu ok. 50 TWh rocznie, mimo jednoczesnego dynamicznego wzrostu zapotrzebowania na energię.

Na podstawie: Ponchet, 2007.



Uwarunkowania historyczne

Dzisiejszy kształt systemów elektroenergetycznych jest efektem procesów technicznych, politycznych oraz historycznych. Na przykład 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 konieczność zapewnienia stałych dostaw energii czy 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, wykorzystując technologie sprowadzane z różnych stron świata. W efekcie w Tokio, w wyniku importu technologii z Niemiec, powstał system o częstotliwości 50 Hz. W Osace natomiast zastosowano technologię amerykańską z częstotliwością 60 Hz. Dopóki 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, taki jak Europa, a druga – 60 Hz, jak USA.

Jest to sytuacja nieoptymalna, możliwości przesyłu energii pomiędzy tymi częściami są bowiem bardzo ograniczone i w jednym kraju konieczne jest stosowanie dwóch różnych standardów urządzeń przemysłowych.

Jednocześnie systemy te są już dziś tak rozbudowane, że zmiana jednego z nich na inną częstotliwość nie wchodzi w grę – wymagałoby to w praktyce budowy nowego równoległego systemu w połowie kraju dla zapewnienia stałego zasilania, a następnie wymiany niemal wszystkich urządzeń elektrycznych innych niż elektronika użytkowa czy AGD. Jest to praktycznie niemożliwe nawet w tak zamożnym i wysoko rozwiniętym kraju jak Japonia.

PRZYKŁAD



Ze względu na uwarunkowania zarówno techniczne, jak i ekonomiczne (konieczność rozłożenia inwestycji w czasie) nawet całkowita transformacja systemu energetycznego, prowadząca do zupełnej zmiany struktury wykorzystywanych źródeł energii, musi być dokonywana w sposób ewolucyjny i nie może polegać na zakwestionowaniu i odrzuceniu systemów już funkcjonujących.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

KU NISKIM EMISJOM

Teoretycznie istnieją trzy możliwości ograniczenia emisyjności energetyki:

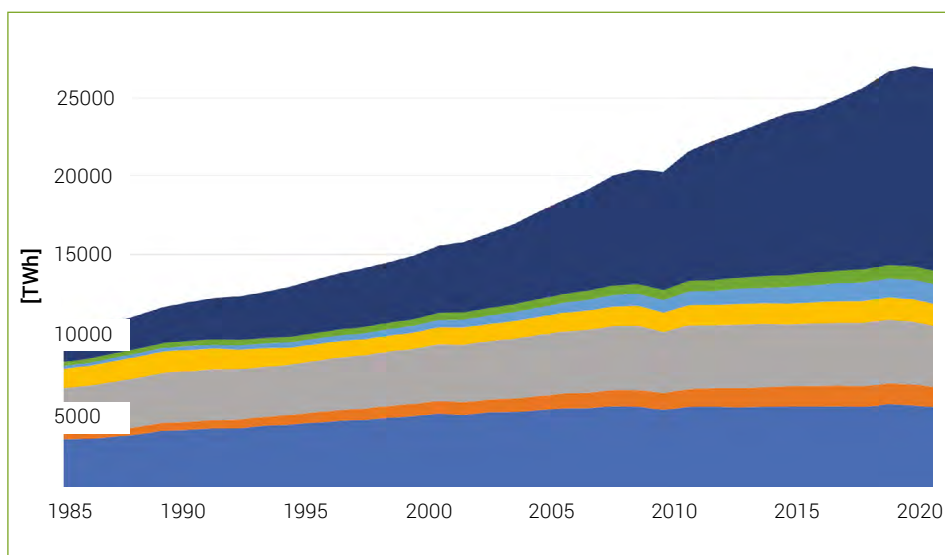
- redukcja zużycia energii, szczególnie elektrycznej,
- zastosowanie układów wychwytu i składowania (lub utylizacji) dwutlenku węgla ze spalin,
- zastępowanie technologii charakteryzujących się wysoką emisyjnością rozwiązaniami nisko- lub bezemisyjnymi.

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, ale sukcesywnie rośnie: w roku 2019 łączna produkcja światowa była o około 130% wyższa niż w roku 1990, a ostatnie podwojenie produkcji trwało 13 lat (tu i dalej w tym akapicie dane za Międzynarodową Agencją Energetyczną, 2019). Jedynym momentem, kiedy produkcja w ujęciu rocznym spadła, był rok 2009 – wynikało to z globalnego kryzysu gospodarczego. W 2010 roku tendencja wzrostowa powróciła, a spadek został nadrobiony. Podobne zjawisko obserwowaliśmy w okresie pandemii, aczkolwiek dokładne dane liczbowe dla całego świata nie są jeszcze dostępne. Opublikowane do tej pory informacje wskazują, że spadek z roku 2020 został odrobiony w roku 2021, podobnie jak było poprzednio. Co ważniejsze, wzrost jest rozłożony bardzo nierównomiernie i dotyczy przede wszystkim wielu gospodarek rozwijających się. Należy przy tym pamiętać, że 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.

Oczekiwanie, by gospodarki te choćby powstrzymały wzrost zużycia energii, nie mówiąc już o jego redukcji, jest nierealistyczne. Jednocześnie jakiegokolwiek ewentualne oszczędności w świecie wysoko rozwiniętym nie będą w stanie wyrównać wzrostu produkcji w gospodarkach rozwijających się. Na przykład wzrost rocznej produkcji energii elektrycznej w samych tylko Indiach i Chinach w latach 2010–2018 (o 3528 TWh) był wyższy niż całe roczne zużycie w Unii Europejskiej w roku 2018 (3282 TWh), (ilustracja 12.2.5). Inaczej rzecz ujmując – aby skompensować wzrost w Indiach i Chinach, w tym samym czasie kraje OECD musiałyby ograniczyć swoje zużycie, które w roku 2010 wyniosło 10 992 TWh, o 1/3. Zauważmy też, że w tym okresie produkcja w krajach OECD 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 państwa o niższym poziomie rozwoju, gdzie zużycie energii wciąż dynamicznie rośnie. Jednym z takich krajów jest Polska (ilustracja 12.2.6.). 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.



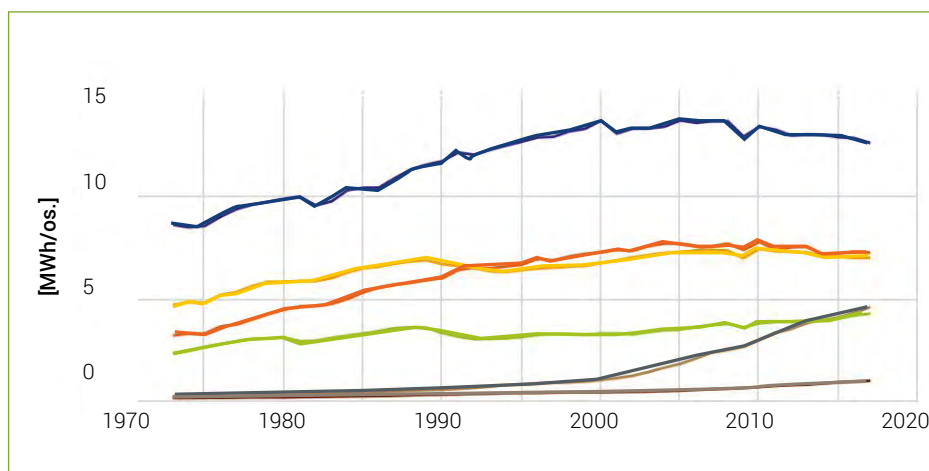
Ilustracja 12.2.5. Produkcja energii elektrycznej w rozbiciu na regiony. Widać dominujące znaczenie rejonu Azji i Pacyfiku. Warto zauważyć, że nawet kryzys gospodarczy w 2009 roku nie przyniósł żadnej trwałej zmiany trendu wzrostowego.

Źródło: BP, 2019.

— Ameryka Północna
— Ameryka Środkowa i Południowa
— Europa
— WNP
— Bliski Wschód
— Afryka
— Azja-Pacyfik

Uwaga: podział na rejony według autorów opracowania BP: „Ameryka Północna” obejmuje tylko Kanadę, Meksyk i USA, a „Azja-Pacyfik” obejmuje Azję bez byłego ZSRR, Australię i Oceanie.

Oczywiście działania mające na celu optymalizację zużycia energii i podnoszenie efektywności jej wykorzystania ze wszelkich miar zasługują na wsparcie jako pożądane i dobre 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 w transporcie, spowoduje ograniczenie zapotrzebowania na nie. Efektywność energetyczna i oszczędzanie energii, choć bardzo istotne, nie zastąpią jednak przebudowy systemu energetycznego i wymiany źródeł energii elektrycznej na bezemisyjne.



Ilustracja 12.2.6. Zużycie energii elektrycznej *per capita* dla wybranych krajów świata

Źródło: Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019.

— Stany Zjednoczone
— Francja
— Niemcy
— Chiny
— Polska
— Indie

Układy wychwyty dwutlenku węgla

Kolejnym potencjalnym rozwiązaniem jest unikanie emisji dwutlenku węgla dzięki jego wychwytowi ze spalin – już po spalaniu paliw kopalnych. Wychwycony dwutlenek węgla można by gromadzić w składowiskach podziemnych lub podmorskich, na przykład wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego czy ropy naftowej. Załaczanie CO₂ do złóż stosuje się niekiedy już teraz w celu wspomagania wydobywania. Powszechne zastosowanie wychwyty i składowania CO₂ (często określanego skrótem CCS od angielskiego *carbon [dioxide] capture and storage*) niosłoby jednak ze sobą liczne trudności, przede wszystkim wynikające z energochłonności tego procesu (prowadziłoby więc do wzrostu zapotrzebowania na paliwo), łączyłoby się ponadto z obawami o szczelność składowisk oraz trudnościami związanymi z transportem wychwyconego gazu z elektrowni do miejsca składowania.

Najpoważniejszą przeszkodą w oparciu dziś polityki dekarbonizacyjnej na CCS jest bardzo słaba dojrzałość tej technologii. Dotychczas powstały nieliczne instalacje demonstracyjne oraz kilka przemysłowych, związanych z przemysłem wydobywczym (część tych ostatnich jeszcze w latach 70. XX wieku). Do tego większość z nich nie prowadzi produkcji energii elektrycznej. W roku 2019 pracujących instalacji CCS w skali przemysłowej było 19; kolejne cztery pozostawały w budowie. Wspólnie owe 23 instalacje będą miały zdolności wychwytu około 40 mln ton CO₂ rocznie. Jest to ilość mniej więcej odpowiadająca 1/3 rocznej emisji polskiej energetyki. Co jednak jeszcze istotniejsze, tylko dwie z 19 istniejących instalacji to bloki energetyczne (i żadna z budowanych obecnie).

Jest to liczba niewystarczająca nawet do zidentyfikowania wszystkich trudności, jakich można oczekiwać przy szerokim wdrażaniu takiej technologii, nie mówiąc już o rozwiązywaniu pojawiających się problemów.

Osobnym wyzwaniem jest utworzenie odpowiednich składowisk dla znaczących – z perspektywy globalnego bilansu – ilości dwutlenku węgla oraz transport takiego gazu do tych składowisk. Kwestia magazynowania dużych ilości takiego CO₂ – w skali istotnej dla poszczególnych krajów, regionów i świata – nie wyszła na razie poza opracowania teoretyczne.

W tym świetle trudno oczekiwać, że w najbliższej przyszłości technologia CCS będzie gotowa do powszechnego zastosowania w energetyce – przeciwnie, dwie instalacje pracujące od zaledwie kilku lat to z pewnością zbyt mało, by choćby pokonać stwierdzone 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. postanowienie Komisji Europejskiej ze stycznia 2008 roku). Pokazuje to, jak ostrożnie należy formułować wskazania dla polityki energetycznej, zwłaszcza odwołujące się do takich rozwiązań, które nie osiągnęły jeszcze dojrzałości technicznej.

Technologie niskoemisyjne i bezemisyjne

W istocie pozostaje zatem droga trzecia – sukcesywne przechodzenie na źródła o niższej emisyjności. Zaliczamy do nich: źródła odnawialne, źródła jądrowe oraz paliwa kopalne o niższej emisyjności (czyli w praktyce zastępowanie węgla gazem ziemnym).

Źródła odnawialne

Odnawialne źródła energii (OZE) to bardzo atrakcyjny kierunek transformacji energetycznej: potencjalnie są dobrą odpowiedzią nie tylko na zagrożenia związane ze zmianą klimatu, ale także na coraz poważniejszy problem wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych. Niestety, wdrażanie ich na większą skalę do systemów energetycznych nie jest sprawą prostą.

Z perspektywy globalnego bilansu energii istotne znaczenie mają trzy rodzaje instalacji OZE: elektrownie wodne, wiatrowe i słoneczne.

DEFINICJA

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, naturalnie, pewne uproszczenie – nawet Słońce nie jest źródłem, które się w jakikolwiek sposób odnawia. 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 nieograniczoną ilością energii, jaką z nich można otrzymać, ale narzucają ograniczenia mocy (czyli stosunku energii do czasu), jaką można pozyskać w danym miejscu. Nie sposób bowiem sprawić, by wiatr czy energia słoneczna zostały skoncentrowane w jakimś miejscu albo zgromadzone na zapas. Jest to sytuacja dokładnie odwrotna niż w przypadku tradycyjnych źródeł kopalnych, których zasoby są skończone, ale możliwość ich transportu pozwala na dość swobodną lokalizację instalacji energetycznych w wybranych miejscach. Prowadzi to m.in. do zajmowania znacznie większej powierzchni terenu niezbędnej do korzystania z większości źródeł odnawialnych.

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 obecnie hydroenergetyka jest trzecim co do znaczenia źródłem energii elektrycznej – po elektrowniach węglowych i gazowych – dostarczającym około 16% elektryczności w skali świata (te i dalsze dane statystyczne w tym podrozdziale za BP, 2019). Niestety, paradoksalnie ogranicza to możliwości redukcji emisji za pomocą tych technologii, gdyż potencjał osiągnięcia przez elektrownie wodne istotnych mocy został już w krajach rozwiniętych w dużej mierze wyczerpany. Przy tym budowa nowych źródeł tam, gdzie to jeszcze możliwe, jest mało prawdopodobna – pozostały już głównie lokalizacje o dość ograniczonym potencjale energetycznym, natomiast realizacja takich elektrowni prowadziłaby do sporych szkód środowiskowych (jak na przykład byłoby w przypadku budowy Kaskady Dolnej Wisły).

Obecnie elektrownie wodne budowane są przede wszystkim w krajach rozwijających się; najszybszy przyrost mocy w takich instalacjach (jak zresztą w każdej innej istotnej klasie technologii energetycznych) obserwowany jest w Chinach. Przyrosty te pozwalają na utrzymywanie udziału energetyki wodnej, niezależnie od wzrostu globalnej produkcji energii. Trudno jednak mieć nadzieję, że energetyka wodna odegra znaczącą rolę w procesie redukcji emisji – jest to co najwyżej zapobieganie jeszcze większym ich wzrostom. Należy przy tym pamiętać, że osiągnięta ona 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 na procesach znanych już wiele lat temu (pierwsza turbina wiatrowa wytwarzająca energię elektryczną powstała w 1887, a ogniwo słoneczne w 1954 roku), to ich wdrożenie do energetyki na wielką skalę (poza bardzo ograniczonymi przypadkami, takimi jak farmy wiatrowe w niektórych rejonach Indii czy Stanów Zjednoczonych) nastąpiło dopiero w dobie aktywnej polityki klimatycznej, czyli już w XXI wieku. Obecnie obie te grupy technologii rozwijają się bardzo dynamicznie, choć nierównomiernie w skali świata – najszybciej w Europie Zachodniej (gdzie zastępują stopniowo inne źródła energii) i w Chinach (gdzie buduje się ich wiele, ale obok źródeł innego rodzaju), zarazem jednak 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 więc 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%, w Indiach – 7,8%, w Afryce – 3,7%, na Bliskim Wschodzie – 0,6%, a w całej Wspólnocie Niepodległych Państw zaledwie 0,2%.

Niestety, wdrażanie źródeł odnawialnych na masową skalę napotyka liczne problemy. W przeciwieństwie do Planu Messmera, czyli przedstawienia gospodarki francuskiej na energię jądrową, 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, bazującej na wcześniejszych technologiach, charakterystyką pracy tych źródeł, która zależna jest od pogody i z reguły nie ma (szczególnie w przypadku wiatru) jakiegokolwiek związku z przebiegiem zmienności zużycia energii w systemach energetycznych. Oznacza to, że poważniejszy udział rozwiązań pozwalających na wykorzystanie źródeł odnawialnych wymaga również transformacji pozostałej części energetyki: musi ona być w stanie sprawnie współpracować z OZE, których moc może się zmieniać bardzo szybko (a przypomnijmy, że bilans systemu musi się zgadzać w każdej chwili). W systemach o dużym udziale OZE konieczna może być także znacząca rozbudowa systemu przesyłowego, ponieważ 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 systemu niemieckiego, w którym najlepsze warunki do rozwoju energetyki wiatrowej panują na północy oraz na morzach, ale okręgi przemysłowe leżą na zachodzie i południu kraju – podobnie jest zresztą w Polsce.

Problemy z włączeniem źródeł wiatrowych i słonecznych do istniejącego systemu energetycznego stają się tym trudniejsze, im więcej wprowadza się do niego tego typu instalacji. 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 energią pochodzącą z innych źródeł. 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 do 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 wtedy, kiedy część z nich pracuje bez przerwy.

BIOMASA to materia pozyskiwana z organizmów przyswajających dwutlenek węgla, stosowana jako jedno z odnawialnych źródeł energii. Ponieważ podczas wzrostu rośliny *per saldo* usuwają z atmosfery CO₂, proces ich spalania może mieć bilans emisyjny bliski zera pod warunkiem, że spala się specjalnie w tym celu uprawianą biomasę, tempo upraw dorównuje tempu zużycia, a procesy uprawy i transportu nie powodują istotnych emisji. W praktyce nie zawsze tak się dzieje i dochodzi do takich sytuacji, jak: spalanie drewna pozyskiwanego z wiekowych lasów, transport morski biomasy, nawet pomiędzy kontynentami, a także spalanie oleju palmowego z plantacji powstałych w miejscu wyciętych (lub wypalonych) lasów deszczowych.

Rozwiązania wykorzystujące spalanie biomasy pochodzącej z rozsądnie zaplanowanych upraw energetycznych dają szansę budowy 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. s. 247). Wdrożenie takich rozwiązań na dużą skalę jest jedną ze wspólnych cech scenariuszy mających na celu zatrzymanie ocieplenia klimatu na poziomie 1,5°C względem epoki przedprzemysłowej i zostało opisane w Specjalnym raporcie IPCC (Masson-Delmotte i in., 2018). Niestety, jak już wspomniano, technologie CCS nie są jednak na tyle dojrzałe, by można je było wdrożyć na masową skalę. Formułowanie scenariuszy polityki energetycznej zakładających wykorzystanie takich technologii jest obecnie przedwczesne.

Elektrownie z ujemnymi emisjami?

Rozwiązaniem mogłoby być zmagazynowanie energii z okresu nadwyżek produkcji, problem polega na tym, że – jak już wspomniano – dostępnych powszechnie technologii magazynowania energii w odpowiednich ilościach i bez znacznych strat zwyczajnie nie ma. Inne rozwiązanie mogłoby polegać po prostu na ograniczaniu produkcji w czasie, kiedy przewyższa ona popyt, ale to z kolei wymaga korekty przepisów gwarantujących odbiór energii wytworzonej przy wykorzystaniu OZE – paradoksalnie w niektórych krajach systemy wsparcia od pewnego momentu stają się przeszkodą dla dalszego rozwoju źródeł odnawialnych; podobnie jest w przypadku ich zwolnienia z uczestnictwa w bieżącym bilansowaniu systemów – umożliwiające to technologie już istnieją, ale nie są wdrażane na masową skalę z powodu braku odpowiednich regulacji prawnych.

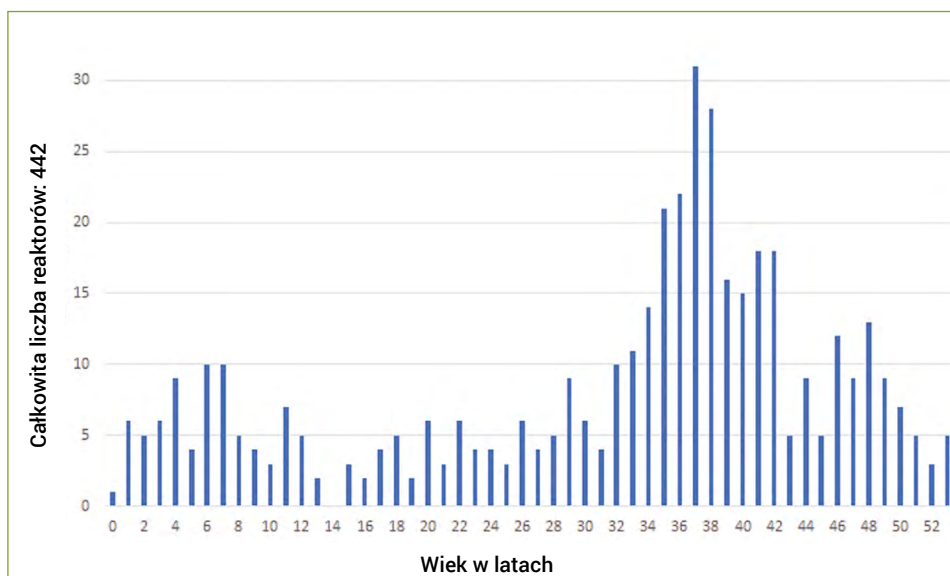
W wielu systemach energetycznych z powodzeniem i na dużą skalę wdrożono rozwiązania wykorzystujące źródła odnawialne inne niż wodne – i to właśnie ze względu na konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Przykładami takich krajów są: Niemcy (32,2% w 2018 roku), Wielka Brytania (31,6%) i Hiszpania (25,7%).

Pomimo trudności technicznych w integracji znaczącego udziału OZE, najważniejszym ograniczeniem w mitygacji emisji za pomocą tych rozwiązań wydaje się wspomniana już regionalizacja. Wysoki udział źródeł wiatrowych czy słonecznych odnotowuje się bowiem jedynie w tych krajach, które prowadzą aktywną politykę ich rozwoju, przede wszystkim w państwach Europy Zachodniej.

Energetyka jądrowa

Teoretycznie energetyka jądrowa może wydawać się prostszym rozwiązaniem prowadzącym do dekarbonizacji. Przede wszystkim istnieje wzorzec w postaci wspomnianego już Planu 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 jednak dużo bardziej skomplikowana.

W rzeczywistości branża jądrowa, szczególnie w świecie zachodnim, znajduje się w bardzo marnej kondycji. Okoliczności, takie jak osiągnięcie w wielu krajach rozwiniętych uznanego ówczesnie za optymalny poziom nasycenia energetyką jądrową dużych systemów energetycznych i spadek społecznej akceptacji dla tego źródła energii, m.in. w następstwie katastrofy w Czarnobylu i wcześniejszej awarii w Three Miles Island, doprowadziły do znaczącego ograniczenia 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 (ilustracja 12.4.7.). 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, co spotęgowało obawy społeczne i zastopowało wiele programów jądrowych i, co więcej, doprowadziło do praktycznego zawieszenia pracy większości elektrowni jądrowych w Japonii. W rezultacie przemysł jądrowy krajów zachodnich (co dziś oznacza przede wszystkim USA i Francję) ma obecnie zdolności do realizacji zaledwie kilku nowych bloków na raz, i to z wielkimi opóźnieniami i przekroczeniami budżetów (najbardziej wymownymi przypadkami są fiński blok Olkiluoto-3, którego budowa miała się zakończyć w roku 2009, a w rzeczywistości zakończyła się dopiero w końcu 2021 roku, oraz amerykańska inwestycja V.C. Summer, która została w ogóle zarzucona), podczas gdy w najlepszych latach – w połowie lat 80. – przekazywano ich do eksploatacji ponad 30 rocznie. Japoński przemysł jądrowy ma dziś zupełnie niejasne perspektywy.



Ilustracja 12.4.7. 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.

Źródło: Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej, 2020.

Także w Korei Południowej po latach dość prężnego rozwoju dochodzi do stagnacji. Obecnie branża budowy nowych elektrowni jądrowych funkcjonuje prężnie w dwóch krajach: w Chinach (obecnie 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 energii w elektrowniach jądrowych przy jednoczesnym wzroście produkcji globalnej 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 dekarbonizacji energetyki, ale i grozi wzrostem emisji w miarę wycofywania z eksploatacji istniejących już bloków. Decyzje polityczne o zastąpieniu istniejących elektrowni jądrowych są w wielu krajach odraczane także dlatego, że większość reaktorów jądrowych można bezpiecznie eksploatować dużo dłużej, niż przewidywano w momencie ich budowy – jedna z amerykańskich elektrowni jądrowych otrzymała już zezwolenie dozoru jądrowego na 80-letnią eksploatację. Jest też wiele przypadków wydłużania eksploatacji do 60 lat. Może się zatem okazać, że w momencie, kiedy trzeba będzie zastąpić stare elektrownie jądrowe nowymi, zabraknie odpowiedniego potencjału przemysłowego, żeby wystarczająco szybko zrealizować takie zamówienia.

Rzadkim przykładem kraju, który próbował podejść do tego zagadnienia w sposób systematyczny, jest Wielka Brytania. Niestety, mimo przygotowania szczególnych mechanizmów zabezpieczających finansowanie oraz umożliwiających sprawny proces wydawania niezbędnych pozwoleń, tylko niektóre z zaplanowanych instalacji są realizowane. Problemem okazały się zarówno rezygnacje inwestorów, którzy uzyskali prawa do budowy elektrowni w konkretnych lokalizacjach, 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. Zarazem 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. Obecnie tylko Francja przygotowuje się do opracowania planów w tym zakresie.

Poza trudnościami związanymi z niedostatecznym potencjałem przemysłowym i ewentualnie czasem niezbędnym do jego odbudowania duże znaczenie dla przyszłości energetyki jądrowej mają również uwarunkowania społeczno-polityczne, w tym spory opór społeczny w niektórych krajach, związany zarówno z samymi elektrowniami, jak i procesem przetwarzania i składowania odpadów, a także konstrukcja 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 utrzymanie udziału obecnego, a w szczególności zastąpienie nowymi istniejących reaktorów, wciąż odgrywają one bowiem znaczącą rolę w gospodarkach krajów wysoko rozwiniętych – 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 emisji, ale nie ich eliminowania, jest zmiana paliw kopalnych na takie o niższej emisyjności. Efekty na dużą skalę może przynieść w szczególności zastępowanie wytwarzania energii z węgla pozyskiwaniem jej z gazu ziemnego: emisyjność energetyki gazowej, mierzona emisjami w spalinach, jest około dwukrotnie niższa niż węglowej, co wynika zarówno ze składu chemicznego gazu (pisaliśmy o tym w rozdziale 3.), jak i ogólnie wyższej sprawności elektrowni gazowych. Należy tu dodać istotne zastrzeżenie. Metan uwalniany do atmosfery ma dużo większy wpływ na efekt cieplarniany niż dwutlenek węgla. W układach wydobywania, przesyłu i dystrybucji gazu ziemnego nieuchronne są 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 między szybem wydobywczym a elektrownią do atmosfery ulatniało się kilkanaście procent gazu – wpływ całego procesu na efekt cieplarniany byłby porównywalny z elektrownią węglową. Według dostępnych danych faktyczne wycieki te są znacznie niższe (Marchese i Zimmerle, 2018), ich monitoring nie jest jednak prowadzony w sposób systematyczny, a z niektórych krajów po prostu nie ma wiarygodnych danych.

Dla zainteresowanych:
<https://smoglab.pl/>

**Dziewiąta rocznica awarii
w Fukushima. Strach przed
atomem jest większy niż strach
przed zmianami klimatu**

Zastępowanie węgla gazem, biorąc pod uwagę emisje gazów cieplarnianych, jest tylko półśrodkiem, ale w całościowo planowanej polityce energetycznej może przynieść wiele korzyści. Po pierwsze, realizowane jest relatywnie szybko, bo wykorzystywane są w tym procesie w pełni dojrzałe technologie. Po drugie, instalacje gazowe charakteryzują się dużo wyższą elastycznością pracy (wyrażającą się czasem uruchomienia czy szybkością zmian mocy w niezbędnym zakresie) i dużo łatwiej zbudować z nich część energetyki wykorzystującej paliwa kopalne i współpracującej 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 na węglu. Przykładem kraju, w którym przyniosło to wyraźny skutek, jest Wielka Brytania.

AKTUALNE TRENDY I PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ

Obecnie paliwa kopalne pozostają najistotniejszym źródłem energii – ich udział w produkcji energii elektrycznej w skali świata w 2018 roku wyniósł 64%, przy czym największa jest tu wciąż rola węgla (38%). Tylko 36% energii pochodzi ze źródeł bezemisyjnych (BP, 2019). Co gorsza, proporcje między paliwami kopalnymi a źródłami bezemisyjnymi pozostają na niemal niezmiennym

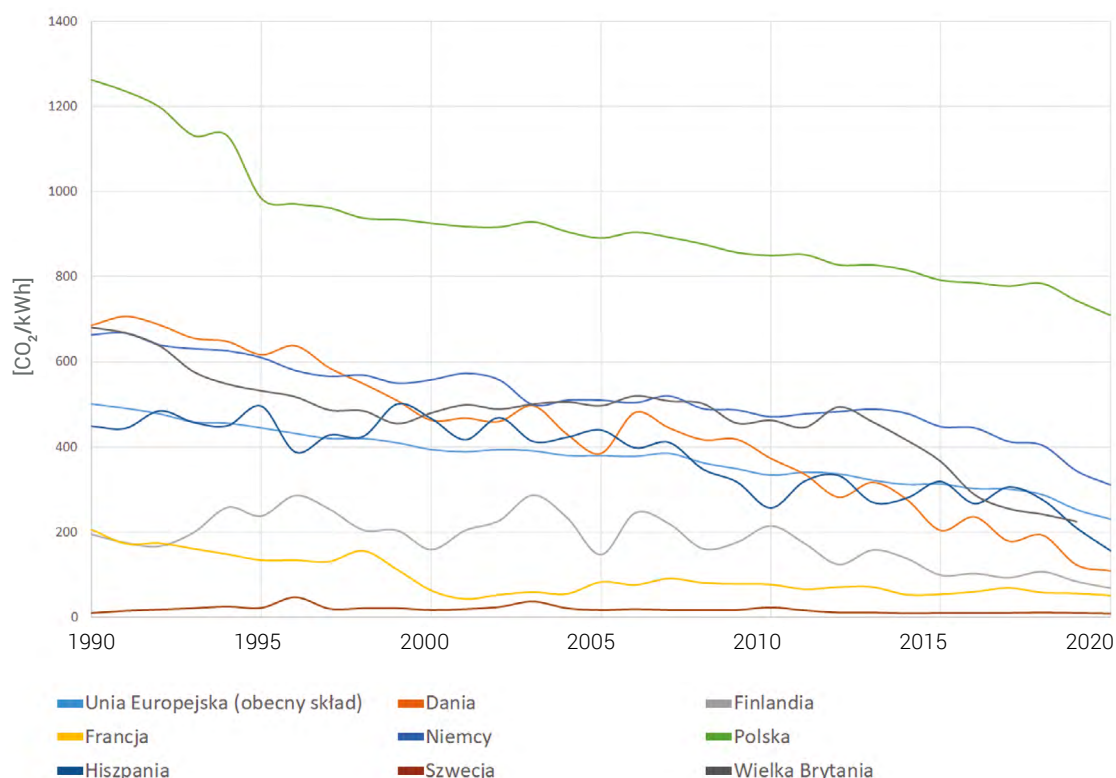


Unsplash; Appolinary Kalashnikova

poziomie od ponad trzech dekad (Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2020). Istnieje kilka systemów energetycznych o bardzo niskiej emisyjności, jednak większość z nich swoją charakterystykę emisyjną uzyskała niejako przy okazji – ograniczanie emisji gazów cieplarnianych nie było bowiem głównym założeniem przy ich konstruowaniu. Są to przede wszystkim systemy: Brazylii, Norwegii, Paragwaju, Albanii oraz Kostaryki i Islandii (które zawdzięczają swój czysty miks energetyczny – tzn. strukturę źródeł energii – dobremu rozwojowi hydroenergetyki, a w przypadku Islandii także geotermii), Francji (dzięki Planowi Messmera), a także Szwajcarii, Finlandii i Szwecji (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 efekt ten uzyskano dzięki masowemu zastosowaniu energetyki wiatrowej – i możliwości wsparcia tej integracji przez systemy krajów sąsiednich (ilustracja 12.4.8.). Trzeba też zwrócić uwagę, że wszystkie wymienione kraje, poza Francją i Brazylią, są stosunkowo niewielkie.

Pozytywnym sygnałem jest systematyczna redukcja emisji z energetyki w systemach, które prowadzą aktywną politykę dekarbonizacyjną. Narzędzia techniczne umożliwiające dążenie do tego celu, choć niełatwe w użyciu i niedające szans na natychmiastowy efekt, istnieją, a systematycznie stosowane mogą przynieść znaczącą poprawę. Ich optymalne wykorzystanie wymaga jednak starannie zaplanowanej i konsekwentnie realizowanej polityki zarówno krajowej, jak i międzynarodowej.

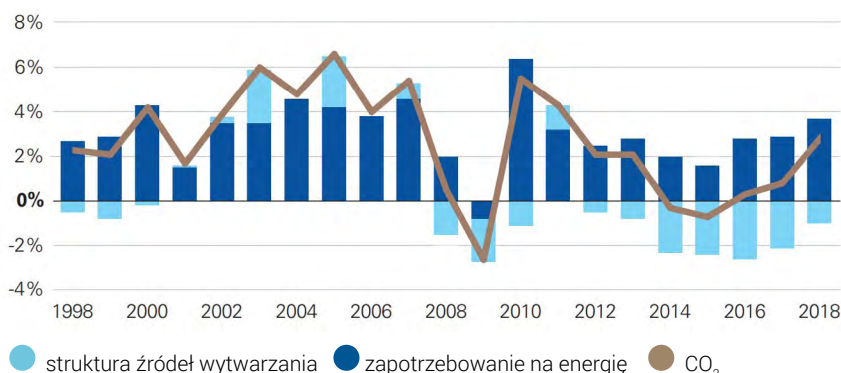


Ilustracja 12.4.8. Stopniowa redukcja emisyjności energetyki wybranych krajów europejskich.
Źródło: Europejska Agencja Środowiska, 2020.

Aktualne trendy w tej dziedzinie 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 (ilustracja 12.4.9.). W praktyce wysiłki na rzecz dekarbonizacji ciągle podejmowane są jedynie na szczeblu krajowym bądź regionalnym, a nad ich pozytywnym wpływem przeważają takie zjawiska, jak szybka budowa nowych elektrowni węglowych w Chinach czy Indiach. Sytuacji nie poprawia też niespójna polityka niektórych państw wysoko rozwiniętych, w których

zastępuje się jedne źródła bezemisyjne 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 zamykaniu sprawnych bloków jądrowych. Gdyby te same środki zostały wykorzystane na budowę podobnych instalacji OZE w kraju, w którym obecnie emisyjność jest wysoka, na przykład w Polsce, przyniosłoby to w skali globalnej redukcję emisji.

Roczna zmiana [%]



Ilustracja 12.4.9. Zmiany emisji z sektora energetycznego wynikające ze zmiany struktury źródeł (*fuel mix*) oraz zmian zapotrzebowania (*power demand*). Widać, że z wyjątkiem lat 2009, 2014 i 2015 zmiana struktury źródeł nie wystarcza nawet do skompensowania wzrostu. Warto też odnotować, że przez wiele lat zmiany struktury wytwarzania powodowały nie spadki, a wzrosty emisji.

Źródło: BP, 2019.

Energiewende to polityka transformacji energetycznej wdrożona w Niemczech, która do dziś nie odniosła spektakularnego sukcesu pod względem ograniczania emisji.

Gdyby Niemcy po roku 1990, kiedy jedynym OZE w bilansie krajowym była hydroenergetyka o udziale 3,5%, przeprowadziły transformację polegającą wyłącznie na zastąpieniu węgla i oleju opałowego gazem ziemnym, to – przy bardzo konserwatywnym założeniu średniej emisyjności elektrowni gazowych na poziomie 500 g/kWh (nowoczesne bloki przy pełnej mocy mogą osiągać poniżej 400) – emisyjność ich energetyki wynosiłaby obecnie około 345 g/kWh. Gdyby tak samo postąpiono w 2000 roku, byłoby to 310 g/kWh (dane wyjściowe według Międzynarodowej Agencji Energetycznej, 2019), (ilustracja 12.4.10). Tymczasem do roku 2016 rzeczywisty wskaźnik wyniósł 441 g/kWh (Europejska Agencja Środowiska, 2020) mimo olbrzymiego wysiłku włożonego w rozwój źródeł odnawialnych.

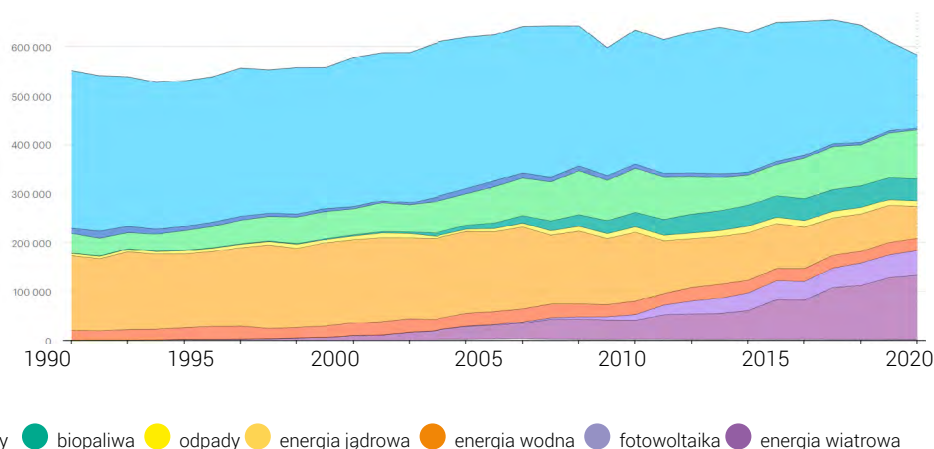
Dzieje się tak dlatego, że szybkiemu rozwojowi OZE w Niemczech towarzyszy wysoki udział węgla – i nie chodzi tu tylko o utrzymywanie starych elektrowni węglowych – niemal 1/3 mocy, bo aż 10 289 z 32 595 MW mocy zainstalowanej w czynnych niemieckich elektrowniach węglowych, to instalacje uruchomione już w XXI wieku (Bundesnetzagentur, 2020), przy równoczesnym zamykaniu elektrowni jądrowych. W ten sposób potencjał redukcji emisji CO₂, wynikający z integracji z systemem źródeł odnawialnych, jest w sporej części marnowany. Pod tym względem sytuacji w Niemczech można przeciwstawić sytuację w Wielkiej Brytanii, w której szybkiemu rozwojowi OZE towarzyszy utrzymanie energetyki jądrowej i sukcesywne zastępowanie węgla gazem ziemnym.

PRZYKŁAD

Ilustracja 12.4.10. Struktura wytwarzania energii elektrycznej w Niemczech w latach 1990–2018.

Widoczny jest utrzymujący się wysoki udział węgla oraz bardzo wolny wzrost sumy produkcji energii pochodzącej ze źródeł bezemisyjnych (tj. OZE i jądrowych łącznie).

Źródło: Międzynarodowa Agencja Energetyczna, 2019.



WSKAZÓWKA NA PRZYSZŁOŚĆ

W obliczu zmiany klimatu transformacja energetyczna jest koniecznością. Niestety, istotną kwestią ograniczającą skuteczność prowadzonej obecnie polityki klimatyczno-energetycznej jest próba rozwiązywania problemu globalnego w ramach działań realizowanych przez poszczególne państwa. 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 prawie nie ma, chociaż 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 dotyczących ekonomii, redukcja emisji gazów cieplarnianych jest w szerszej perspektywie przykładem dylematu dotyczącego dóbr wspólnych, czyli tragedii wspólnego pastwiska (rozdział 4., s. 79). Takie dylematy mogą być, niestety, rozwiązane jedynie w drodze długotrwałego planowania, regulacji i współpracy wiążącej wszystkie strony. Jednocześnie wsparcie ze strony technologii i inżynierii, również poprzez inwestycje w badania naukowe oraz tworzenie nowych i powtórne ożywienie niektórych starszych technologii, będzie niezbędne, jeżeli chcemy, aby ograniczenie zmiany klimatu się powiodło. W ostatecznym rozrachunku transformacja energetyczna jest problemem nie tylko technologicznym i inżynierskim, lecz także społecznym i politycznym.

12.3. Smog a zmiana klimatu

Problem zmiany klimatu i emisji gazów cieplarnianych jest często mylony z zagrożeniami związanymi ze smogiem, czyli problemem złej jakości powietrza, którym oddychamy. Są to jednak dwa różne, choć mocno ze sobą związane problemy. Z czasem zależności między nimi mogą być coraz silniejsze.

CO TO JEST SMOG?

Określenie „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”.

Powietrze jest jednak mniej lub bardziej zanieczyszczone przez cały rok, nawet wtedy, kiedy nie ma typowego smogu zimowego (kiedyś: „londyńskiego”) lub letniego (fotochemicznego). Słowo „smog” jest dziś po prostu wygodnym synonimem dla zanieczyszczeń powietrza, które mają bezpośredni wpływ na nasze samopoczucie, zdrowie i życie.

Jakie zanieczyszczenia nazywamy smogiem? Przede wszystkim tzw. pył zawieszony (często spotykane skróty $PM_{2.5}$, PM_{10} , od ang. *particulate matter*) wraz ze wszystkimi szkodliwymi substancjami, które się w nim znajdują, na przykład benzo[a]pirenem (Juda-Rezler i Toczko, 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. Cząstki (nie cząsteczki!) pyłu mogą się składać również z wielu innych substancji (Juda-Rezler i Toczko, 2016), są bardzo małe – kilka, a nawet kilkanaście tysięcy razy mniejsze niż średnica 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 (Juda-Rezler i Toczko, 2016).

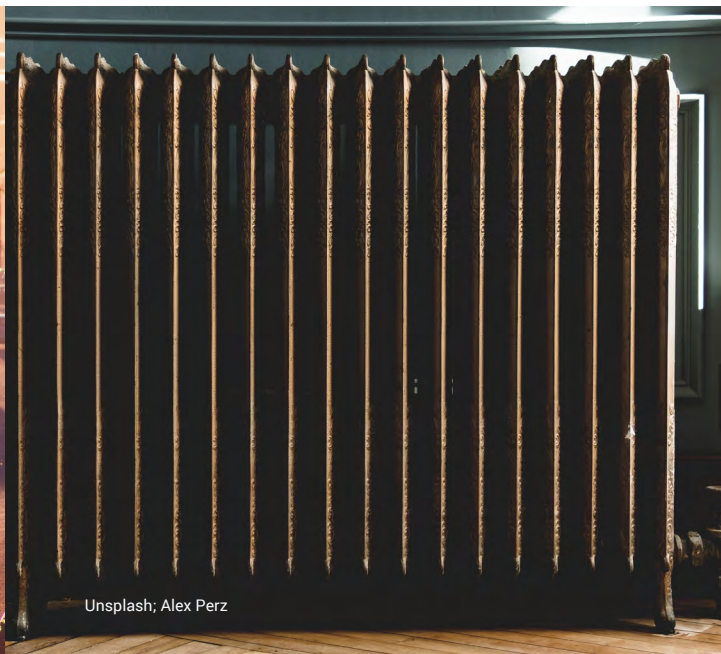
Niewiele lepiej jest w Polsce z zanieczyszczeniem powietrza dwutlenkiem azotu, którego źródłem są przede wszystkim silniki spalinowe. Z kolei problem z ozonem jest w naszym kraju mniejszy niż na południu Europy. Przy dużym nasłonecznieniu także w Polsce ozon może jednak występować w stężeniach, które nie są obojętne dla naszego zdrowia.

Fizycy atmosfery zamiast określenia „pyły zawieszone” wolą używać terminu „aerozole”.

DLACZEGO PROBLEM JAKOŚCI POWIETRZA MOŻE NAM SIĘ MYLIĆ Z PROBLEMEM ZMIANY KLIMATU?

Gazy cieplarniane i substancje składające się na smog mogą nam się 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 dwutlenku siarki powodującego kwaśne deszcze, choć korzystne dla naszego zdrowia, ekosystemów i zabytków, przyspieszyło (!) zmianę klimatu.



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.

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 – chociaż transport i ogrzewanie mają tu też znaczny udział.

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 (niemal połowę całej polskiej emisji tego gazu!), w przeciwieństwie do domowych palenisk są jednak wyposażone

w coraz lepsze instalacje zmniejszające emisje pyłu, tlenków azotu i siarki. Ich wpływ na powstawanie smogu jest więc stosunkowo niewielki, choć na klimat – bardzo duży. Właśnie dlatego działacze antysmogowi zwracają uwagę przede wszystkim na domowe piece i kotły na węgiel i drewno oraz na samochody, 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. Jest to możliwe przy zastosowaniu nowoczesnych urządzeń grzewczych i silników spalinowych, a także dzięki wykorzystaniu różnego typu filtrów, katalizatorów i innych rozwiązań technicznych, tak jak jest 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), nie jest to jednak – jak się przekonamy za chwilę – idealne rozwiązanie.

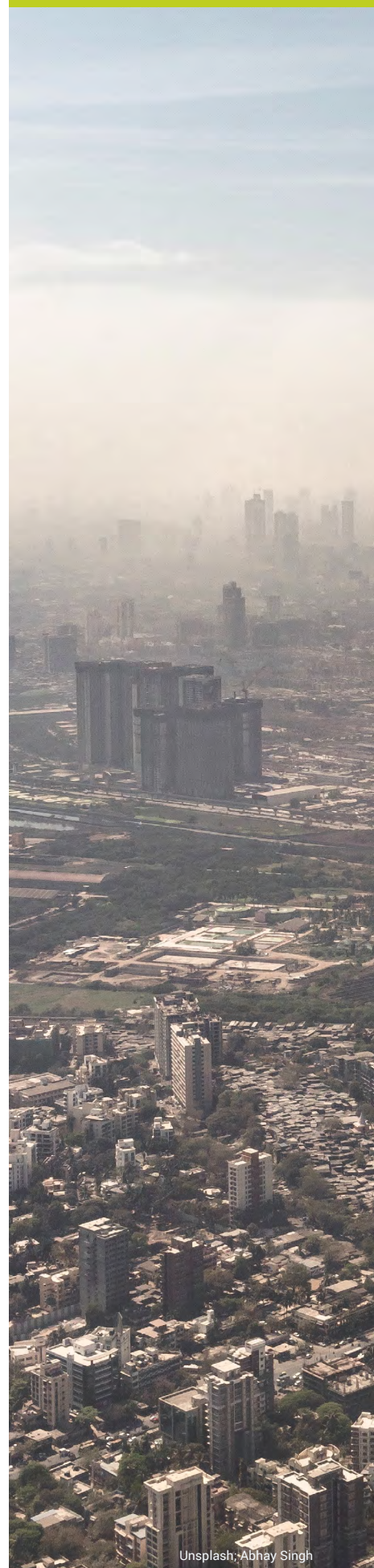
PRAW CHEMII NIE DA SIĘ OSZUKAĆ

W skład paliw kopalnych i biomasy wchodzi przecież węgiel (tu w znaczeniu: szósty pierwiastek układu okresowego), 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 około 3,67 kg CO₂. Jeśli spalanie nie jest całkowite, to powstanie nieco mniej CO₂, ale wtedy część pierwiastkowego węgla obecnego w paliwie wejdzie w skład tlenku węgla (CO), lotnych związków organicznych (LZO) lub sadzy – ważnych składników smogu.

Emisji CO₂ wynikającej ze spalania paliw kopalnych lub biomasy nie da się więc zmniejszać tak, jak daje 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. Dlatego, chociaż dla walki ze smogiem zamiana innych paliw kopalnych na gaz ziemny jest bardzo dobrym rozwiązaniem, to dla ochrony klimatu jest ono nie do przyjęcia.

GAZ ZIEMNY JEST BARDZO NIEBEZPIECZNY DLA KLIMATU

Jest jednak 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, ponieważ z czasem metan utlenia się do dwutlenku węgla, więc jego wpływ na klimat maleje.



**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

ZMIANA KLIMATU JEST NIEPORÓWNYWALNIE WIĘKSZYM WYZWANIEM NIŻ SMOG

Wiadomo już, dlaczego smog jest dla nas mniejszym wyzwaniem niż zmiana klimatu, a także dlaczego działania antysmogowe nie zawsze pomagają w jej zatrzymaniu.

Żeby oczyścić powietrze ze smogu, nie trzeba rezygnować ze spalania paliw kopalnych i biomasy – wystarczy spalać je „czysto”. Aby spowolnić zmianę klimatu i uchronić się przed katastrofą klimatyczną, potrzebne są jednak dużo bardziej radykalne kroki: musimy w ogóle przestać korzystać z paliw kopalnych jako źródła energii. Albo robić to tak, by nie emitować do atmosfery powstającego przy ich spalaniu dwutlenku węgla, czyli wychwytywać i magazynować CO₂, stosując techniki CCS, o których była mowa na s. 247, i które – jak już wiemy – są trudne technicznie, kosztowne i (poza pilotażowymi instalacjami) szerzej niestosowane.

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 łatwo 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 aktywnie usuwać CO₂ bezpośrednio z powietrza (*direct air capture*). A to, podobnie jak sekwestracja dwutlenku węgla (CCS), jest i kosztowne, i trudne technicznie. Ale jest, niestety, niezbędne, jeśli mamy mieć jakiegokolwiek szanse na uchronienie się przed katastrofą klimatyczną.

Z kolei średni czas życia cząsteczki metanu w powietrzu to 10 lat – znacznie krótszy niż dwutlenku węgla, choć zarazem znacznie dłuższy niż składników smogu.

CO JESZCZE MAJĄ WSPÓLNEGO SMOG I ZMIANA KLIMATU?

Pożary lasów

Związków między smogiem a zmianą klimatu jest więcej. Jej konsekwencją są na przykład częstsze i potężniejsze pożary lasów, a te bardzo pogarszają jakość powietrza. Dobrze było to widzieć w Australii, a nieco wcześniej w Brazylii, kiedy płonęły lasy Amazonii. Wpływ pożarów lasów na jakość powietrza to zresztą dobrze znany problem. Okresowe wypalanie lasów w Malezji i Indonezji od lat powoduje smog w Singapurze. W 2010 roku potężne pożary lasów i torfowisk spowodowały gęstym dymem Moskwę.

Wysokie stężenia CO₂ mają bezpośredni wpływ na nasze samopoczucie

Innym wspólnym punktem problemu jakości powietrza i zmiany klimatu jest wpływ rosnącego stężenia CO₂ w atmosferze na nasze zdrowie i samopoczucie, a zwłaszcza na sprawność intelektualną, koncentrację i uwagę.

CZY WIESZ, ŻE ?

Stan powietrza w Polsce nieco się poprawił 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 negatywne skutki zmiany klimatu są znacznie poważniejsze niż nieliczne jej pozytywne konsekwencje.



O szybkim i wolnym cyklu węglowym piszemy w rozdziale 2.

Takie efekty można zaobserwować w zatłoczonych, dusznych, niewietrzonych pomieszczeniach już przy stężeniach CO₂ wynoszących około 600–700 ppm (części lub cząsteczek na milion), (Fisk i in., 2013; Jacobson i in., 2019; Satish i in., 2012). Mamy tu jednak na myśli powietrze zewnętrzne, w którym tzw. stężenie tła dla dwutlenku węgla już obecnie sięga 420 ppm i stale rośnie (jest to wartość średnia, uwzględniająca sezonowe wahania związane z okresem wegetacyjnym na półkuli północnej). Jeśli nie ograniczymy emisji CO₂, to już za kilka dekad stężenie tego gazu w atmosferze w dowolnym miejscu planety przekroczy 600 ppm. Nawet przy niższych stężeniach CO₂ coraz trudniej będzie nam wietrzyć budynki, by utrzymać w nich wystarczająco dobrą jakość powietrza.

Co więcej, trzeba też pamiętać, że pomiaru stężenia tła dokonuje się z dala od źródeł emisji dwutlenku węgla, na przykład na środku Oceanu Spokojnego (Mauna Loa). W miastach, gdzie jest dużo różnych źródeł CO₂ – silniki spalinyowe 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, najwyższy czas to zmienić.



Dla zainteresowanych:
www.naukaoklimacie.pl

Homo sapiens w świecie wysokich stężeń CO₂



NAUKA O KLIMACIE
DLA SIEPPRACYCH



Dla zainteresowanych:

materiały poświęcone
miejskiej czapie CO₂
(CO₂ urban zone)

dostępne na stronie
Carbon Dioxide

www.co2science.org/subject/urban/summaries/urbanco2dome.php



Wikimedia; Jacek Halicki

CZY WIESZ, ŻE ?

Szacuje się, że z powodu złej jakości powietrza co roku przedwcześnie umiera w Polsce 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

ORCID 0000-0002-1837-2086, Uniwersytet Warszawski

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485, Uniwersytet Warszawski

BEATA ŁOPACIUK-GONCZARYK

ORCID 0000-0002-1486-2408, Uniwersytet Warszawski

WIKTOR KOTOWSKI

ORCID 0000-0002-1486-2408, Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

ORCID 0000-0001-7252-4581, Uniwersytet Warszawski

13. Działania ograniczające zmianę klimatu – przyroda, gospodarka, społeczeństwo

W ostatnim rozdziale tej książki piszemy o rozwiązaniach mitygacyjnych i adaptacyjnych związanych z przyrodą, gospodarką i społeczeństwem, jakie można podejmować już teraz.

Znanych jest wiele działań związanych z ochroną przyrody i gospodarowaniem ziemią, w tym z rolnictwem, które mogą pomóc ludziom przystosować się do zmiany klimatu oraz ją ograniczać. Nie zastąpią one, omawianych w poprzednich rozdziałach, transformacji energetycznej i redukcji gazów cieplarnianych we wszystkich sektorach gospodarki. Mogą jednak je uzupełnić i dać ludziom więcej czasu na wprowadzenie skutecznych strategii powstrzymania zmian klimatycznych.

Kolejne sfery, które opisujemy w tej książce, to sfera społeczna, sfera ekonomii i wreszcie obszar indywidualnych działań jednostek i postaw obywatelskich. Są one ważne dla dokonania transformacji na rzecz klimatu. Bez zrozumienia problemu i solidarnego wsparcia społecznego realizacja celów klimatycznych nie będzie możliwa. Rozdziałom dotyczącym społeczeństwa nadaliśmy charakter problemowy, jest to bowiem obszar, w którym nadal bardzo wiele kwestii jest przedmiotem dyskusji.

Kończymy tę książkę krótkim podsumowaniem podstawowych faktów o zmianie klimatu i najczęstszych związanych z nią nieporozumieniach. Nadaliśmy mu formę pytań i odpowiedzi z nadzieją, że taka jego postać nie tylko pozwoli na uporządkowanie sobie wiedzy zawartej w naszym podręczniku, ale i ułatwi prowadzenie rozmów na te tematy w szerszym gronie.

A lush green forest scene with a path leading through the trees. The path is paved and curves through the forest, surrounded by dense foliage and tall trees. The lighting is bright, suggesting a sunny day. The overall atmosphere is peaceful and natural.

Gorąco zachęcamy również do zapoznania się z tekstem **Naukowcy całego świata ogłaszają klimatyczny stan wyjątkowy**, będącym polskim przekładem artykułu, który ukazał się w czasopiśmie *Bioscience* na przełomie 2019 i 2020 roku. William Ripple wraz ze współautorami oraz 11 tysiącami naukowców-sygnatariuszy z ponad 150 krajów opisują w nim zagrożenie kryzysem klimatycznym i w syntetyczny sposób omawiają sześć najważniejszych obszarów, w których konieczne są zmiany: pozyskiwanie energii, zanieczyszczenia krótkotrwałe, przyrodę, produkcję żywności, gospodarkę i ludzką populację. Tekst ten jest – bez wchodzenia w szczegóły – rodzajem konsensusu przedstawicieli różnych dziedzin nauki w niełatwej i najbardziej dyskusyjnej sferze rozwiązań. Trzeba pamiętać, że rozwiązania tylko w jednej dziedzinie nie wystarczą. Musimy je wprowadzać we wszystkich obszarach.



<https://us.edu.pl/apel-naukowcow-pt-world-scientists-warning-of-a-climate-emergency/>

MAGDALENA BUDZISZEWSKAORCID 0000-0002-1837-2086
Uniwersytet Warszawski**ZBIGNIEW BOHDANOWICZ**ORCID 0000-0002-5430-048
Uniwersytet Warszawski**BEATA ŁOPACIUK-GONCZARYK**ORCID 0000-0002-1486-2408
Uniwersytet Warszawski

13.1. Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – rozwiązania ekonomiczne

Czy zwróciłeś uwagę, że wiele firm i wielu polityków podejmujących bardzo szkodliwe dla środowiska decyzje, jednocześnie chętnie prowadzi kampanie ekologiczne, w których namawia ludzi do sprzątania lasu lub sortowania śmieci? Kiedy rozmawiamy o śmieceniu w lesie, o tym, czy inni ludzie, a nawet my sami, poprawnie sortujemy śmieci, często zapominamy o pozostałych – bardzo ważnych – kwestiach. A przecież warto by zapytać: Co się dzieje ze śmieciami po posortowaniu? Jak zorganizowano dalsze etapy recyklingu? Jaki jest ich rzeczywisty sens i koszt środowiskowy? A przede wszystkim, dlaczego produkujemy tak wielkie ilości opakowań, przez co wszyscy ponosimy wysokie koszty ich utylizacji? Czy nie byłoby lepiej – zamiast skupiać się na recyklingu – mniej ich produkować? Albo chociaż ująć w koszcie produkcji szkody ekologiczne? Co by się zdarzyło, gdyby konsekwentnie stosowano zasadę „zanieczyszczający płaci”, a koszt środowiskowy śmieci nie byłby ukryty, lecz odzwierciedlony w cenie produktu? To bardzo dobre pytania, ale odpowiedzi na nie nie są ani łatwe, ani jednoznaczne. Niezależnie jednak od tego, jak ważne jest rozwiązanie problemu śmieci dla życia na naszej planecie, warto pamiętać, że nawet najszerzej prowadzony recykling nie wystarczy do przezwyciężenia kryzysu klimatycznego. Aby powstrzymać zmianę klimatu, musimy przede wszystkim przestać spalać paliwa kopalne!

W tym podrozdziale omówimy rozwiązania ekonomiczne i prawne pozwalające na skuteczne ograniczenie ilości paliw kopalnych wykorzystywanych przez gospodarkę (mitygacyjne) oraz ułatwiające przystosowanie się do nadchodzących zmian (adaptacyjne).

MITYGACJA ZMIANY KLIMATU

Jak wielokrotnie wspominaliśmy w całej książce, najistotniejszym elementem scenariuszy pozwalających na zatrzymanie zmiany klimatu jest znaczące ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. W tej części skoncentrujemy się na rozwiązaniach, które pozwoliłyby zrealizować ten cel, takich jak: generowanie energii ze źródeł niskoemisyjnych, podnoszenie efektywności energetycznej oraz zmiany w różnych działach produkcji przemysłowej i rolnej, a także w transporcie oraz w zachowaniach konsumenckich. Narzędzia służące do mitygacji zmiany klimatu zostaną przedstawione w kontekście działań podejmowanych przez Unię Europejską w celu osiągnięcia neutralności klimatycznej do 2050 roku. Wspólnota ta podejmuje najwięcej inicjatyw, aby ograniczyć emisyjność gospodarki, ale podobne rozwiązania są wprowadzane również w innych rejonach świata.

Unia Europejska poważnie traktuje cele, omawianego w rozdziale 12., Porozumienia paryskiego i na ich podstawie formułuje rozwiązania prawne oraz strategię rozwoju na kolejne dziesięciolecia. Obecnie UE dąży do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 55% do roku 2030 i do osiągnięcia pełnej neutralności klimatycznej do roku 2050. Takie cele zostały ustalone w lipcu 2021 przez Komisję Europejską w ramach Planu Klimatycznego 2030.

Liczne działania na szczeblu unijnym można pogrupować w trzy duże kategorie, które omówimy bardziej szczegółowo w dalszej części tego rozdziału. Są to:

- opodatkowanie emisji dwutlenku węgla,
- poprawa efektywności energetycznej,
- dekarbonizacja sektora energetycznego, czyli 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. Podatki, które mają zmniejszać efekty zewnętrzne, nazywane są ogólnie **podatkami Pigou**, od nazwiska ekonomisty Arthura Pigou, który jako jeden z pierwszych zajmował się tym zagadnieniem.

W UE paliwa kopalne używane do transportu lub ogrzewania obciążone są podatkiem akcyzowym, nie jest on jednak związany z poziomem emisji, lecz z ilością energii, jaką z określonego paliwa można uzyskać. 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 uzyskiwania na te emisje odpowiednich pozwoleń. Mechanizm ten działa zgodnie z zasadą **Cap&Trade** – całkowity poziom emisji CO₂ z gospodarki regulowany jest przez łączną liczbę pozwoleń, którymi podmioty podlegające regulacjom mogą swobodnie handlować. W tym systemie emisje redukowane są poprzez stopniowe zmniejszanie liczby dostępnych na rynku pozwoleń. Zaletą tego rozwiązania (jeśli działa prawidłowo) jest redukcowanie emisji przede wszystkim w tych przedsiębiorstwach, w których koszt redukcji jest najmniejszy. Pokażmy to na przykładzie: założmy, że planowana jest transakcja pozwoleniem na emisję: przedsiębiorstwo A chce sprzedać pozwolenie na emisję tony CO₂ za kwotę mniejszą niż 50 zł, a przedsiębiorstwo B chce je kupić. Powinno być tak, że przedsiębiorstwo A wystawia takie pozwolenie na sprzedaż tylko wtedy, kiedy jest w stanie obniżyć własne emisje o tonę CO₂ za kwotę mniejszą niż 50 zł uzyskane ze sprzedaży, w ten sposób bowiem odniesie korzyść finansową. Natomiast przedsiębiorstwo B kupuje pozwolenie za 50 zł, kiedy jego nakłady na redukcję emisji są wyższe od kosztu pozwolenia.



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.

Mechanizm ten, wprowadzony w UE w 2005 roku, przez długi czas w praktyce był nieskuteczny. Ceny pozwoleń pozostawały bardzo niskie, ponieważ w chwili uruchomienia systemu przydzielono zbyt dużo pozwoleń (przyznawano je 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 pozwolenia, wykorzystując luki prawne. System ten jednak był 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, można się więc spodziewać, że mechanizm ten będzie skuteczniej hamował poziom emisji. Niestety system EU ETS obejmuje tylko największe firmy (ok. 11 000 podmiotów), które odpowiadają za około połowę emisji CO₂ w UE. Pytanie o mechanizm mający skłaniać do rezygnacji z paliw kopalnych mniejsze firmy i odbiorców indywidualnych pozostaje otwarte.

Często, rozważając działania mające zmniejszyć emisje gazów cieplarnianych, mówi się o ograniczaniu korzystania z samolotów (pisaliśmy o tym w rozdziale 3.). Rezygnacja z podróży lotniczych jest jednak dla wielu osób bardzo trudna, szczególnie gdy okazuje się, że samolot to tańszy środek transportu niż pociąg czy samochód.

Dlaczego tak się dzieje? Obecnie jedynie paliwa lotnicze nie są obciążone podatkiem akcyzowym. Należałoby zacząć rozmowę o tym od pytania, czy nie powinno się tego zmienić. Dopóki podróże samolotem będą nie tylko szybsze, ale i mniej kosztowne, jedynie osoby mogące przeznaczyć na podróż więcej czasu i pieniędzy albo bardzo zdeterminowane, aby ograniczyć swój negatywny wpływ na środowisko, będą decydować się na pokonanie tej samej trasy w inny sposób.

Ciekawym sposobem na ograniczenie emisji CO₂ jest zaproponowany w 2015 roku przez Jamesa Hansena **podatek w formule „Carbon Fee and 100% dividend”** (opłata za emisję i 100% dywidendy). Mechanizm tego rozwiązania jest bardzo prosty. Wszystkie emisje dwutlenku węgla obciążone są kwotą, która stopniowo wzrasta, zgodnie z przyjętym 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. Pod tym względem to rozwiązanie nie różni się niczym od innych podatków, które znamy. Wyjątkowe w tej propozycji jest to, co dzieje się z zebranymi w ten sposób pieniędzmi: cała kwota jest dzielona na równe części i – po odliczeniu symbolicznych kosztów administracyjnych – przekazywana wszystkim obywatelom danego kraju. Dzięki temu osoby mające stosunkowo niewielki udział w konsumpcji, a tym samym w mniejszym stopniu przyczyniające się do emisji CO₂ niż przeciętny mieszkaniec kraju, odnoszą finansową korzyść. Jest to zatem mechanizm finansowo korzystny dla większości mieszkańców, bo w największym stopniu „karana” jest relatywnie mała grupa osób, których konsumpcja powoduje ogromne emisje. Ponieważ podatek najbardziej podnosi ceny tych dóbr i usług, które powodują duże emisje, zniechęca do ich wybiera-

nia, a mniej emisyjne alternatywy stają się bardziej atrakcyjne cenowo. Chociaż wielu osobom taki podatek może wydawać się utopią, okazuje się, że sprawdza się on w praktyce. Podobne rozwiązanie zostało wprowadzone w 2008 roku w prowincji Kolumbia Brytyjska w Kanadzie oraz w całej Szwajcarii. W tych krajach zebraną kwotę podzielono – większość zwracano mieszkańcom, pozostałą część przeznaczano na inne cele związane z ograniczaniem zmiany klimatu lub na wsparcie dla takich podmiotów, jak szkoły, szpitale czy małe firmy. Efekty były bardzo dobre, zarówno pod względem ograniczenia emisji CO₂, jak i poprawy sytuacji materialnej ludzi. Wyniki te skłoniły władze Kanady do rozszerzenia takiego podatku na kolejne prowincje.

Efektywność energetyczna

Obecnie duża część wytwarzanej 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 – mniej paliwa, a budynki wymagały mniej energii do ogrzewania i chłodzenia. Według szacunków UE działania te mają do 2030 roku poprawić efektywność energetyczną o ok. 30% i tym samym znacząco przyczynić się do uniezależnienia gospodarki od paliw kopalnych.

Podnoszenie efektywności energetycznej to nie tylko ograniczanie ilości energii zużywanej w trakcie eksploatacji. Istotne jest też uwzględnianie „cyklu życia produktu”, czyli całego procesu rozpoczynającego się od pozyskania surowców,



Dla zainteresowanych:
www.ec.europa.eu

**Dyrektywa UE dot.
efektywności energetycznej**
Energy efficiency directive

Wiele osób jest przeciwnych regulacjom narzucającym producentom coraz wyższe standardy energetyczne. Odwołują się do wyidealizowanego wyobrażenia wolnego rynku, argumentując, że nie wolno węg ingerować. W takim rozumowaniu zapomina się jednak, że wiele współczesnych rynków, w tym kluczowe dla kryzysu klimatycznego rynki transportu i energii oraz rynki żywności, już są rynkami w dużym stopniu regulowanymi za pomocą licznych obostrzeń, podatków i dopłat. Regulacje te jednak wcale nie służą celom środowiskowym – często jest wręcz przeciwnie: prowadzą do takiego paradoksu, że produkty wymagające większych ilości energii i zasobów oraz bardziej obciążające środowisko mają niższą cenę rynkową i są dla konsumenta tańsze niż te prostsze, wytworzone mniejszym nakładem energii i surowców.

Kolejnym przykładem po podróży lotniczych są ceny lokalnie uprawianych warzyw, które niekiedy bywają wyższe niż mięsa, chociaż produkcja warzyw wymaga znacznie mniej energii. Jest tak dlatego, że rynek mięsa często uważa się za ważny dla interesu kraju i systemowo wspiera różnymi dopłatami. Uwzględnienie efektów środowiskowych nie tyle więc zwiększy liczbę regulacji rynkowych, ile urealni funkcjonowanie rynku w określonych warunkach fizycznych.





Dla zainteresowanych:
opis inicjatywy **Right to Repair**

PRZYKŁAD

następnie produkcji, dystrybucji, sprzedaży, a dopiero potem jego użytkowania i wreszcie utylizacji. Wydłużenie okresu korzystania z wszelkich produktów pozytywnie wpływa zarówno na efektywność energetyczną (energia zużyta do produkcji jest wykorzystywana dłużej), jak i na środowisko (mniej odpadów). Do końca 2022 roku mają zostać wprowadzone w UE nowe regulacje dotyczące elektroniki użytkowej i urządzeń AGD (**Right to repair**). Zgodnie z tym rozporządzeniem producent musi zapewnić dostępność części i oprogramowania do produkowanych przez siebie urządzeń, większość elementów urządzenia ma być łatwo wymienialna, a naprawy powinny być możliwe do przeprowadzenia za pomocą standardowych, prostych narzędzi.

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), a zarazem właściciele takich samochodów obciążeni są wyższymi podatkami. Wydawałoby się, że to prawo, jakkolwiek dotkliwe dla kierowców, skutecznie zmieni transport samochodowy na bardziej przyjazny dla środowiska.

Okazało 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, całkowity wpływ tej regulacji może być sprzeczny z oczekiwaniami. 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 – nawet jeśli w nieco mniejszym stopniu – wpływają na klimat i środowisko.

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 w rozdziale 12., w tym miejscu ograniczymy się więc do zwrócenia uwagi tylko na aspekt finansowy.

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 ten sektor gospodarki może się nie podobać. Należy jednak pamiętać, że obecne wsparcie (w postaci ulg, subwencji, ochrony prawnej itp.) dla sektora paliw kopalnych jest wielokrotnie większe niż ewentualne środki przeznaczone na rozwój źródeł niskoemisyjnych. Dlatego coraz częściej pojawiają się głosy, 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



Dla zainteresowanych:
<https://www.wti.org/research/publications/773/subsidies-clean-energy-and-climate-change/>

Raport nt. subwencji
dla różnych źródeł energii
w kontekście zmiany klimatu

Raport World Trade Institute

źródeł niskoemisyjnych. Dzięki takiej decyzji ogromne kwoty obecnie wydawane na ochronę systemu energetycznego, którego funkcjonowanie przybliża nas do katastrofy klimatycznej, zostałyby skierowane na rozwój energetyki niskoemisyjnej.



Flickr.com; Greg Webb

Elektrownia jądrowa w okolicy miasta Ōi w Japonii

OPŁACALNOŚĆ ENERGETYKI JĄDROWEJ

Energia jądrowa to wydajne i niskoemisyjne źródło energii, rozważane przez władze Unii Europejskiej jako ważny element transformacji energetycznej na naszym kontynencie. Opinie na temat energii jądrowej są podzielone. W części krajów przeważają głosy, że jest to niebezpieczna technologia, od której należy odchodzić, w innych – że jest niezbędnym elementem systemu energetycznego, w którym nie korzysta się z paliw kopalnych.

Ważnym argumentem w tej dyskusji jest ocena konkurencyjności energii jądrowej względem energii pochodzącej z innych źródeł. Na wysokość kosztów teraz i w przyszłości istotny wpływ mają regulacje prawne – na przykład wyznaczające cenę pozwoleń emisji CO₂ czy zmieniające wymagania dotyczące bezpieczeństwa lub czystości spalin. Ogromne znaczenie 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 jej wysokość ma w większości przypadków znaczenie decydujące. Obliczenia wykonane dla elektrowni jądrowych i węglowych wykazały, że przy stopie dyskonta równej 5% koszty produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych były niższe niż w przypadku elektrowni węglowych lub gazowych, natomiast przy stopie dyskonta 10% koszt produkcji w tych trzech typach elektrowni staje się podobny i im bardziej stopa dyskontowa rośnie, tym wyższy jest koszt produkcji energii elektrycznej w elektrowniach jądrowych (NEA, 2020). Ponadto w obliczeniach zazwyczaj przyjmuje się, że czas eksploatacji elektrowni jądrowej wynosi 40 lat, co jest okresem, na który zwykle udzielane są licencje. Czas pracy elektrowni jest jednak przeważnie wydłużany do 60, a nawet 80 lat po weryfikacji jej stanu technicznego, co znacznie zwiększa opłacalność jej budowy (Rothwell, 1997).

W tym kontekście zastanawiająca jest decyzja Niemiec o zamykaniu wszystkich działających w tym kraju elektrowni jądrowych do końca 2022 roku. Na przykład w maju 2020 roku wyburzono wieżę chłodniczą zamykanej elektrowni jądrowej w Philippsburgu, która zaspokajała 1/6 zapotrzebowania na elektryczność ludności Badenii-Wirtembergii.

Nie ma zatem zgody co do przyszłych kosztów wytwarzania energii w elektrowniach jądrowych w porównaniu z kosztami energii uzyskiwanej z innych źródeł (czyli elektrowni gazowych, węglowych, paneli fotowoltaicznych, farm wiatrowych i innych). Nic więc dziwnego, że badania porównawcze podejmowane przez różne osoby czy instytucje prowadzą czasem do przeciwstawnych wniosków, zwłaszcza wtedy, gdy reprezentują one sprzeczne interesy.

O ile opłacalność budowy nowych elektrowni może być dyskusyjna, o tyle nie ulega wątpliwości, że z tych już zbudowanych i sprawnych należy korzystać jak najdłużej. Atrakcyjność energetyki jądrowej opiera się głównie na bardzo niskich, w porównaniu z węglem czy gazem, kosztach paliwa oraz długim okresie eksploatacji elektrowni, wynoszącym zazwyczaj 60–80 lat. Dla porównania: przyjmowany standardowy 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.

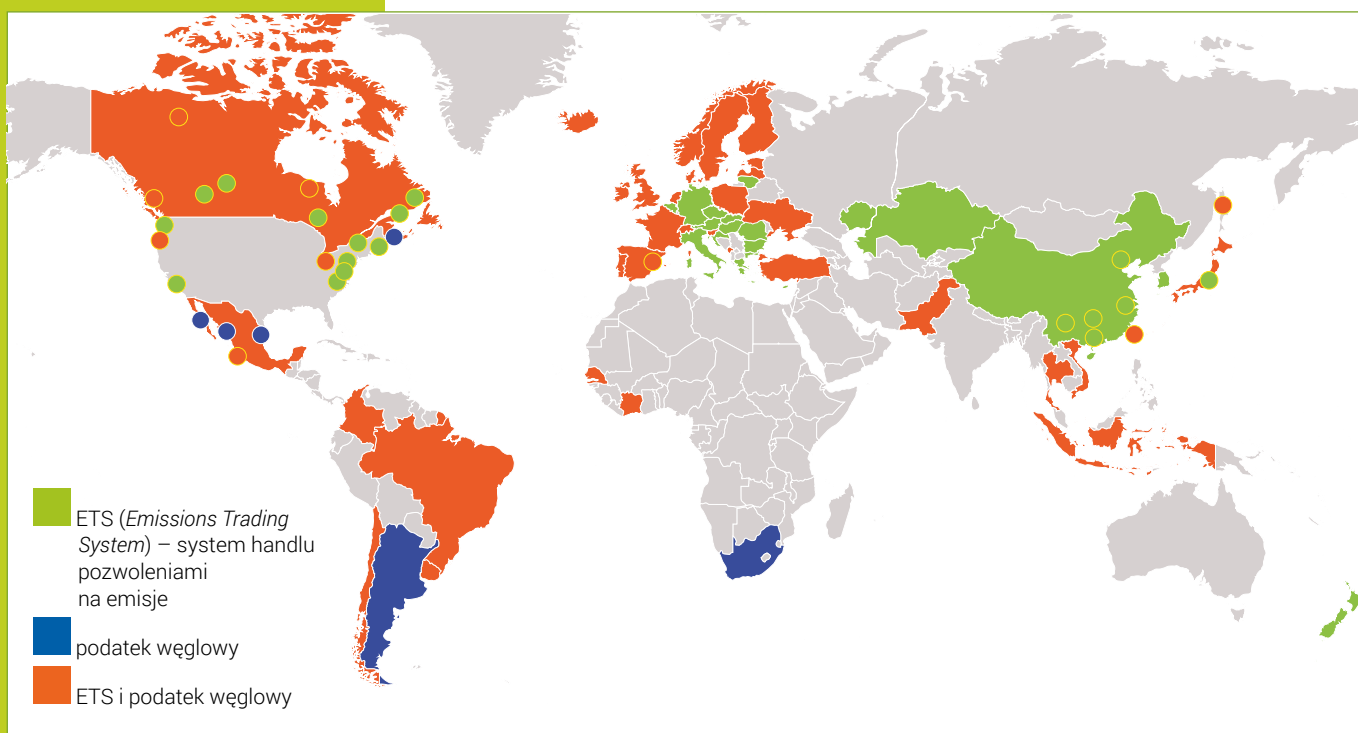
Ilustracja 13.1.1.

Wprowadzone lub planowane do wprowadzenia rozwiązania ekonomiczne ograniczające emisje CO₂ (podatek węglowy i rynek pozwoleń na emisje). Stan na rok 2022.

Źródło: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

Mitygacja zmiany klimatu na świecie

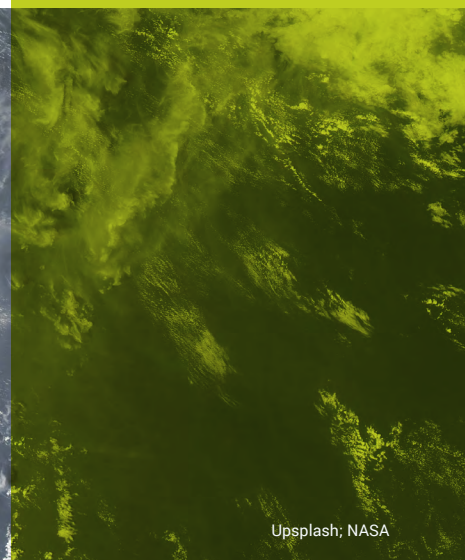
Działania podejmowane w UE w celu ograniczenia poziomu emisji są ważne, jednak do skutecznego ograniczenia zmiany klimatu konieczne jest ich wprowadzenie we wszystkich krajach. A jak to wygląda na świecie? Tak jak w UE, inne kraje korzystają z podobnych narzędzi: podatków węglowych oraz rynku



pozwoleń na emisje. Na ilustracji 13.1.1. oznaczono państwa, w których rozwiązania te są stosowane lub planowane jest ich wprowadzenie.

Dobrze, że wiele krajów stosuje już narzędzia finansowe, które obciążają kosztami emisje CO₂. Kluczowe jednak będzie ich wprowadzenie w dużych gospodarkach, które nie stosują regulacji ograniczających emisje, takich jak: Stany Zjednoczone, Indie czy Rosja, oraz zwiększenie skuteczności tych rozwiązań.

Niezwykle ważne jest dzisiaj osiągnięcie w niedalekiej przyszłości międzynarodowego porozumienia, które będzie egzekwować deklaracje złożone w Porozumieniu paryskim z 2015 roku. Dałoby to szansę na przezwycięzenie „tragicii wspólnego pastwiska” i skuteczne ograniczenie globalnych emisji. Sam twórca tej koncepcji, Garrett Hardin, podkreślał, że słowa „tragedia” nie należy rozumieć dosłownie i po nieoczekiwanym sukcesie stworzonego przez siebie pojęcia doszedł do wniosku, że powinien był zatytułować swoją pracę „Tragedia nieuregulowanych dóbr wspólnych” („Tragedy of Unregulated Commons”), bo dzięki ich regulacji tragedii można uniknąć.



Upsplash; NASA

ADAPTACJA DO ZMIANY KLIMATU

Jak wiesz z rozdziału 8., 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. Dlatego oprócz działań mitygacyjnych konieczne jest podejmowanie działań adaptacyjnych, zwiększających odporność społeczeństwa i gospodarki na występowanie niespotykanych do tej pory zjawisk klimatycznych.

Działaniom adaptacyjnym poświęca się coraz więcej uwagi ze względu na ich pozytywny wpływ na poziomach zarówno lokalnym, jak i globalnym oraz relatywnie łatwiejsze wprowadzenie ich w życie niż działań mitygacyjnych. Należy jednak podkreślić, że chociaż adaptacja do zmiany klimatu ma istotne znaczenie dla łagodzenia jej skutków, to nie może zastąpić działań mających na celu ograniczanie skali globalnego ocieplenia. Możemy dostosować się do pewnego zakresu wzrostu globalnej temperatury, prawdopodobnie nie większego niż 1,5–2 °C, ale dostosowanie się do coraz szybciej postępującego ocieplenia, osiągającego poziom 3–4 °C i wyższy jest, niestety, niemożliwe. Co więcej,



Dla zainteresowanych:
<https://climate-adapt.eea.europa.eu>

W UE dzięki współpracy między Komisją Europejską a Europejską Agencją Środowiska powstała inicjatywa ADAPT, której zadaniem jest wspieranie państw członkowskich w adaptacji do zmiany klimatu.

Dla zainteresowanych:

<https://pan.pl/>

Komunikat interdyscyplinarnego Zespołu doradczego ds. kryzysu klimatycznego przy Prezesie PAN

Naturalna retencja wody kluczowa w walce z suszą i powodzią w Polsce



Dla zainteresowanych:

<https://klimada2.ios.gov.pl>

Warto zajrzeć na stronę projektu Klimada zawierającego plany adaptacji do zmiany klimatu czterdziestu czterech miast w Polsce.



wymagałoby to z pewnością dużych ilości energii i surowców, co spowodowałoby dodatkowe emisje gazów cieplarnianych – na przykład korzystanie z urządzeń klimatyzacyjnych zwiększa zużycie energii elektrycznej, która najczęściej jest pozyskiwana z paliw kopalnych.

Czym są działania adaptacyjne?

Na liście działań adaptacyjnych, które powinny być realizowane w Polsce, wskazanych przez Ministerstwo Środowiska w opracowaniu przygotowanym już w 2013 roku, znalazły się m.in.:

- zapobieganie niedoborom wody, unikanie projektowania inwestycji na terenach zagrożonych powodzią, zrównoważone użytkowanie zlewni rzek kosztem ograniczenia gruntów ornych i budownictwa, przywracanie rzekom naturalnego biegu, budowa zbiorników retencyjnych czy stworzenie warunków krajobrazowych sprzyjających bezpiecznemu gromadzeniu wody w okresie jej nadmiaru i oszczędnym wykorzystywaniu jej w trakcie suszy;
- wdrożenie rozwiązań zabezpieczających przed przerwami w dostępie do energii elektrycznej na skutek awarii spowodowanych huraganami i burzami oraz wynikających ze zwiększonego zapotrzebowania na wodę do chłodzenia elektrowni w okresie upałów;
- przygotowanie rolnictwa na susze, fale 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, pociągającego za sobą wzrost częstotliwości powodzi sztormowych, degradację brzegu morskiego oraz ryzyko skażenia lub zasolenia wód gruntowych;
- przygotowanie opieki zdrowotnej do wyższej zachorowalności na raka skóry, zwiększenia liczby osób z chorobami układu krążenia i oddechowego zagrożonych konsekwencjami upałów oraz szerzenia się chorób odkleszczowych.

Ministerstwo Środowiska opracowało również specjalne plany adaptacji miast do zmiany klimatu ze względu na stojące przed nimi szczególnie poważne wyzwania. Charakterystyczne dla wielu współczesnych miast duże obszary szczelnej nawierzchni uniemożliwiają odpływ wód opadowych i roztopowych, co przyczynia się do przeciążenia systemów kanalizacyjnych i wiąże ze zwiększonym ryzykiem podtopień i powodzi. W okresie letnim rejonry silnie zurbanizowane z powodu częstszych i dłuższych okresów upałów są szczególnie narażone na niedobory wody i występowanie wysp ciepła. Utrudniona jest w nich 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 działania, jakie należy podjąć w celu adaptacji do zmiany klimatu. Jak zatem wygląda praktyka działań adaptacyjnych w Polsce?

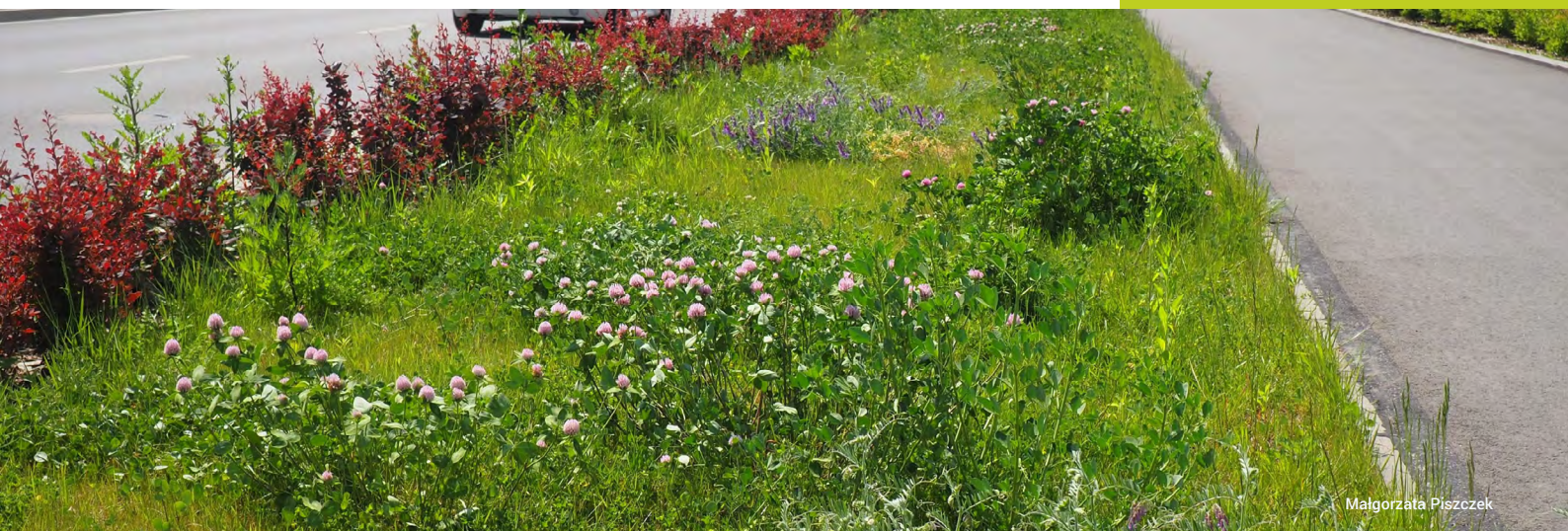
Przykładem dobrej praktyki związanej z małą retencją, a jednocześnie ochroną bioróżnorodności jest stworzenie mokradła „Przemkowskie Bagno” w Przemkowskim Parku Krajobrazowym w południowo-zachodniej Polsce. Działanie to pozwoliło zmienić teren byłego poligonu w siedlisko wodno-błotne zwiększające możliwości 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. Coraz więcej osób zaczyna też 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.



Dla zainteresowanych:
www.wwf.pl
 Raport przygotowany
 przez WWF

Dobre praktyki utrzymania rzek



Małgorzata Piszczek

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 przykrytych kamieniami, zalanych asfaltem lub wyłożonych betonową kostką. 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 Włodzicy (rejon Kotliny Kłodzkiej), sfinansowane ze środków UE przeznaczonych na projekty proekologiczne. Projekt ten zrealizowano na wniosek mieszkańców posiadających domy na terenach zalewowych i skarżących się na sezonowe podtopienia. Bez przeprowadzenia analizy wpływu tej inwestycji na środowisko wykonano „remont istniejącej zabudowy regulacyjnej wraz z modernizacją stopni celem poprawienia spływu wód oraz umożliwienia migracji ryb”, który zniszczył ekosystem rzeki i przyspieszył spływ wody, pogłębiając zagrożenie suszą. Ten przykład pokazuje, że duże kwoty przeznaczone są na nieprzemyślane i szkodliwe ekologicznie przedsięwzięcia, podczas gdy powinniśmy wykorzystywać je w sposób pożyteczny dla środowiska. W tym przypadku cel ochrony przeciwpowodziowej został osiągnięty kosztem dewastacji ekologicznej i zwiększonego ryzyka wystąpienia suszy. Dlatego podejmując wszelkie działania, musimy mieć szerokie spojrzenie na rozmaite ich konsekwencje, tak aby naprawiając jeden problem, nie powodować jednocześnie innych.

Rzadko koszone trawniki
 we Wrocławiu.



Więcej o działaniach ograniczających ryzyko suszy i powodzi dowiesz się z dokumentu przygotowanego przez Polską Akademię Nauk:

Climate change and water resources management in Poland

Wskazówki Banku Światowego dotyczące adaptacji miast do zmian klimatu

Guide to climate change adaptation in Cities



Paweł Kisiel

Włódzica w Nowej Rudzie przed uregulowaniem i po zrealizowaniu tej inwestycji w latach 2008–2009.

Dla zainteresowanych:
www.wwf.pl

Raport przygotowany przez WWF

Dobre praktyki utrzymania rzek



Paweł Kisiel

PODSUMOWANIE

Istnieje wiele narzędzi ekonomicznych umożliwiających redukcję emisji, dobrze opisanych przez specjalistów i sprawdzonych w praktyce. Na razie implementowane są one w ograniczonym zakresie, ich wpływ na globalny poziom emisji jest zatem stosunkowo niewielki. Konieczne jest stosowanie ich na szeroką skalę, adekwatnie do stojących przed nami wyzwań.

**WSKAZÓWKI
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Również metody skutecznej adaptacji są znane i opisane w opracowaniach publikowanych przez instytucje rządowe. Część tych działań jest wprowadzana w życie, ale wciąż zaskakująco często realizowane są kosztowne projekty, które pogarszają naszą sytuację i perspektywę 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.

13.2. Mitygacja i adaptacja do zmiany klimatu – gospodarowanie ekosystemami

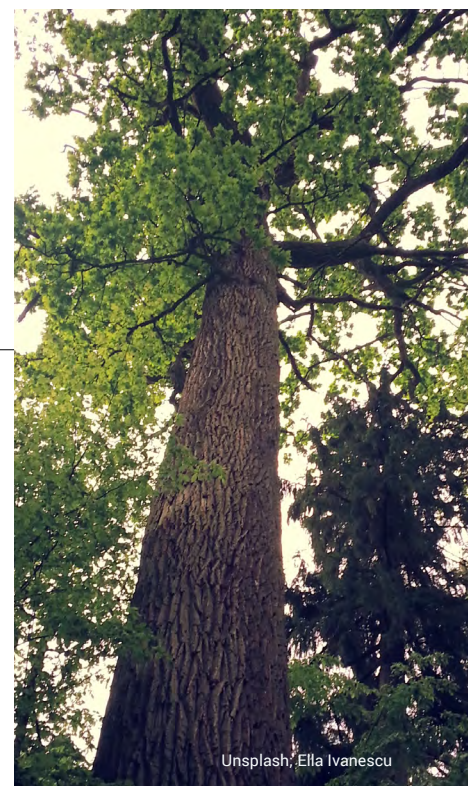
Jak zapewne pamiętasz z rozdziału 10., gospodarując ekosystemami (przede wszystkim lądowymi), możemy oddziaływać znacząco na klimat, wpływając zarówno na wymuszenia, jak i na sprzężenia klimatyczne. Nasze działania ograniczające zmianę klimatu (mitygacyjne) powinny polegać z jednej strony na osłabianiu wymuszeń (w szczególności emisji gazów cieplarnianych i zmian użytkowania gruntów) oraz dodatknych sprzężeń (zwiększających emisje), a z drugiej – na wzmacnianiu ujemnych sprzężeń zwrotnych (w szczególności tych związanych z sekwestracją węgla w ekosystemach).

Działania skupiające się na przyrodzie to także adaptacja, czyli zmniejszanie wrażliwości ekosystemów, włącznie z antroposferą, na zmianę klimatu, na przykład 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. Niestety tempo ich zanikania wciąż przyspiesza. Dlatego skuteczna ochrona pozostałych jeszcze ekosystemów naturalnych jest podstawowym warunkiem koniecznym do powstrzymania kryzysu klimatyczno-ekologicznego. Jednym z działań na rzecz zahamowania degradacji ekosystemów jest tworzenie obszarów chronionych. W ostatnich latach ich areał w skali świata rósł, dochodząc dziś do niecałych 15% powierzchni lądowej i morskiej świata. Pamiętajmy jednak, 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, m.in. niedawny konflikt 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, na przykład łąk kośnych i pastwisk. W sensie ścisłym trudno już dziś mówić o istnieniu ekosystemów całkowicie naturalnych, prawie wszędzie bowiem sięga jakiś wpływ człowieka.



Unsplash, Ella Ivanescu



Dla zainteresowanych:

<https://smoglab.pl/>

Przy Poleskim Parku Narodowym powstanie kopalnia?



O projekcie **half-earth**, mającym na celu zwiększenie obszarów chronionych, przeczytasz na stronie www.half-earthproject.org



O usługach ekosystemowych przeczytasz więcej w podrozdziale 9.5.

Ochrona czynna polega na aktywnych działaniach człowieka, przyspieszających lub powstrzymujących procesy naturalne dla osiągnięcia określonych 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) wzajemnie wzmacniających swój efekt. Na przykład zwiększenie udziału lasów naturalnych w krajobrazie skutkuje zwykle większym pochłanianiem dwutlenku węgla, wzmacnia retencję wody i podnosi bogactwo gatunkowe.

CZY WIESZ, ŻE ?

Organizacja Narodów Zjednoczonych ogłosiła lata 2021–2030 dekadą restytucji ekosystemów, podkreślając proklimatyczne znaczenie tego rozwiązania.

ONZ wystosowała globalne „wezwanie do działania” w celu zmobilizowania wsparcia politycznego i finansowego niezbędnego do odtworzenia wylesionych i zdegradowanych ekosystemów w nadchodzącym dziesięcioleciu, aby poprawić warunki życia 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 na stronie www.decadeonrestoration.org

Potencjalna roślinność naturalna to formacja roślinna, która zregenerowałaby się na danym obszarze, gdyby ustąpiła jakakolwiek aktywność człowieka.

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). Jest 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 synergią najróżniejszych efektów przyrodniczych.

Niekiedy stosuje się 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 na przykład 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 (jak w przypadku lasów, o czym piszemy w następnym akapicie), ale w obu sposobach postępowania ostatecznym celem jest przywrócenie naturalnych procesów przyrodniczych.

Lasy. Odtwarzanie ekosystemów leśnych, powszechnie utożsamiane z zalesianiem, to jedno z najważniejszych działań proklimatycznych. Lasy są jednym z najefektywniejszych (w naszej perspektywie czasowej) pochłaniaczy węgla. Oszacowano, jak pisaliśmy w podrozdziale 10.3., że w skali świata możliwe jest zalesienie miliarda hektarów gruntów. Nawet jeśli ten areał i wiązany z nim potencjał akumulacji ponad 200 Gt węgla uznamy za nieco przeszacowany, 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 traktować zamiennie. Węgiel zgromadzony w drzewach przeznaczonych do wycięcia wróci do atmosfery znacznie szybciej niż ten z lasów naturalnych: natychmiast po rozłożeniu się drewna ze ściętych drzew lub po wykorzystaniu go jako opału. Tylko w wyjątkowych sytuacjach drewno stosowane w budownictwie zachowuje zasymilowany węgiel dłużej niż kilkadziesiąt lat. Las gospodarczy również stanowi magazyn węgla (zawartego nie tylko nad ziemią, ale też pod jej powierzchnią), jest on jednak znacznie mniejszy niż ten, jakim jest las naturalny, ponieważ martwe drewno nie zasila puli materii organicznej w glebach, które, co więcej, 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), ekosystemy leśne zwykle 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.

Przykładem odtworzenia lasu drogą naturalnej sukcesji jest regeneracja tzw. Lasu Ochronnego Szast w Puszczy Piskiej po wiatrolomie 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 przez człowieka (Szwagrzyk i in., 2018). Samoistna restytucja była więc zarówno skuteczniejsza, jak i tańsza niż sztuczne zalesianie, choć powstały las może nie być dogodny dla standardowej gospodarki leśnej.

PRZYKŁAD

Las Ochronny Szast w 2016 roku – 14 lat po przejściu huraganu.



Jerzy Szwagrzyk



Dla zainteresowanych:
www.naukawpolsce.pl

Samoczynnie odradzający się las gospodarczy – to większa bioróżnorodność

ZAPAMIĘTAJ!

Regeneracja lasów, obok ogromnego potencjału ściągania dwutlenku węgla stanowiącego ważny sposób **mitygacji** 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 podrozdziale 10.1. pisaliśmy o odtwarzaniu osuszonych torfowisk w celu powstrzymania ucieczki do atmosfery zakumulowanego w nich węgla. Rocznie z odwodnionych torfowisk w skali świata emitowanych jest około 2 Gt CO₂, czyli odpowiednik 5% emisji antropogenicznych. Ta wielkość wskazuje potencjał mitygacji: dokonując ponownego nawodnienia zaledwie 0,3% powierzchni łądów (tyle zajmują osuszone torfowiska), jesteśmy w stanie powstrzymać emisję 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 zatamować te sztuczne cieki, by przywrócić gromadzenie się wody w tych miejscach. Niestety ze względu na zmiany fizyczne, chemiczne i biologiczne zachodzące w osuszonym torfie odtworzone bagna nie będą takie same jak te, które istniały przed osuszeniem, niemniej jednak efekt klimatyczny ujawni się natychmiast 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.

Projekt Life Peat Restore, mający na celu ponowne nawodnienie 5,3 tys. ha osuszonych torfowisk, realizowany jest w Niemczech, Polsce, Litwie, Łotwie i Estonii.

Więcej na ten temat przeczytasz na stronie www.life-peat-restore.eu/pl

O ile głównym argumentem za odtwarzaniem obszarów bagiennych w wymiarze globalnym jest ograniczanie emisji CO₂, to w wymiarach lokalnym i regionalnym najważniejszymi korzyściami płynącymi z takich działań jest retencja wody i wspomaganie jej obiegu między łądem a atmosferą. W regionach narażonych na susze i ekstremalne upały restytucja mokradeł stanowi bardzo ważną adaptację do zmiany klimatu.



Paweł Pawlaczyk

Zastawka blokująca rów odwadniający na torfowisku.

PRZYKŁAD

Dobrym przykładem odtwarzania bagien jest niemiecki system Moorfutures, wdrożony przez trzy kraje związkowe (Meklemburgię-Pomorze Przednie, Brandenburgię 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. Liczba ton CO₂, które nie zostały wyemitowane dzięki przekształceniu dotychczas użytkowanych rolniczo odwodnionych torfowisk w bagna, jest wyliczana na podstawie badań naukowych.

Więcej na ten temat przeczytasz na stronie www.moorfutures.de

PALUDIKULTURA, CZYLI ROLNICTWO BAGIENNE

Ponieważ większość odwodnionych torfowisk jest użytkowanych rolniczo, ich restytucja przyrodnicza, mająca na celu odtworzenie bagien naturalnych, oznaczałaby konieczność wykupu ogromnych terenów od aktualnych właścicieli. Nie jest to wcale konieczne dla powstrzymania emisji. Alternatywą jest paludikultura, czyli rolnictwo bagienne, pozwalające na utrzymanie funkcji produkcyjnej torfowisk po przywróceniu na nich wcześniejszych warunków. Trzcina czy różne gatunki pałki wodnej, a także drzewa takie jak olsza to rośliny, które można uprawiać na ponownie nawodnionych torfowiskach i wykorzystywać ich drewno w skali przemysłowej z przeznaczeniem na produkcję energii (spalanie, biogaz) czy wytwarzanie materiałów budowlanych lub ociepleniowych. Innym przykładem paludikultury jest uprawa na wyeksploatowanych torfowiskach mchów torfowców do stosowania w ogrodnictwie zamiast – jak jest obecnie – pozyskiwania ich kosztem niszczenia kolejnych naturalnych bagien torfowych.

Więcej o paludikulturze na stronie Centrum Bagien
www.moorwissen.de/en/paludikultur/paludikultur.php



Wiktor Kotowski



Wiktor Kotowski

Pałka szerokolistna (po lewej) i wykonana z niej płyta konstrukcyjna ociepleniowa (na górze). Zwróć uwagę na widoczne na przekroju pędów roślin gąbczaste tkanki, które decydują o znakomitych właściwościach izolacyjnych wykonanych z nich materiałów.



Upsplash: Mick de Paola



Rzeki należą do najważniejszych regulatorów przepływu wody między lądem a oceanem, a przy tym odpowiadają za przemieszczanie się niesionych przez nią substancji. Pamiętajmy, że to nie tylko koryto rzeczne z płynącą wodą. Ekosystem rzeki jest ściśle połączony funkcjonalnie z obszarem zlewni, z którego spływa woda, a także z przylegającymi terenami, w szczególności doliną rzeczną 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 susze w okresach bezdeszczowych. Problem pogłębiły regulacje rzek, które zmniejszyły pojemność koryta, odcinając wałami tereny zalewowe, i skróciły bieg rzeki, eliminując jej meandry, co doprowadziło do zaniku mokradeł nadrzecznych. Zmiany te nie tylko zmniejszyły retencję wody, ale i znacznie upośledziły zdolność rzek do samooczyszczania. Obecnie, gdy w rolnictwie używa się coraz większych ilości nawozów, które m.in. powodują eutrofizację (przeżyźnienie) ekosystemów wodnych (piszemy o tym ramce), odtwarzanie rzek wraz z bagiennymi strefami buforowymi jest jednym z najważniejszych działań zaradczych. Restytucja rzek to przywracanie naturalnych procesów hydromorfologicznych, usuwanie przeszkód w migracji ryb i transporcie osadów, przenoszenie dalej od brzegów rzeki wałów przeciwpowodziowych, aby umożliwić rozładowywanie wód wezbraniowych na terenach zalewowych, i wiele innych działań.

O praktycznych aspektach restytucji rzek i innych ekosystemów wodnych przeczytasz w podręczniku wydanym w 2020 roku przez Wody Polskie:

Podręcznik dobrych praktyk renaturyzacji wód powierzchniowych.



Bagienne strefy buforowe

– recepta na przeżyźnienie 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 będącymi składnikami nawozów. Rośliny bagienne oraz żyjące w strefie korzeniowej mikroorganizmy oczyszczają z nich wodę, zanim trafi ona do rzek, a z nimi dalej do morza. Jak zapewne pamiętasz z podrozdziału 10.4., zaburzenie cyklu azotu i fosforu należy do najbardziej dotkliwych problemów środowiskowych naszych czasów – jest jedną z dwóch najbardziej przekroczonych granic planetarnych. Ocieplenie klimatu potęguje zjawisko eutrofizacji wód: w wyższych temperaturach szybciej dochodzi do zakwitów sinic i wystąpienia deficytów tlenu. Pamiętajmy, że odtwarzanie nadrzecznych mokradeł jednocześnie zwiększa retencję wody, spowalniając jej spływ do morza, i zapewnia 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) wykazano, że byłoby to działanie efektywne kosztowo: odtworzenie 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 z kosztami 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.



Ewa Jabłońska

Niewielka rzeka
z bagienną strefą
butorową.

PRZYKŁAD

Odtwarzanie terenów zalewowych – adaptacja 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.



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 pustynnienie i erozję gleb. Wskutek degradacji obszarów rolniczych w dużym tempie wycina się kolejne obszary naturalnych lasów i osusza bagna. Ten model rolnictwa jest z założenia niezrównoważony w długiej perspektywie czasowej, opiera się bowiem na eksploatacji gleb wytworzonych w ekosystemach naturalnych przez ich przekształcenie w grunty orne. Główne działania przyspieszające erozję i utratę materii organicznej (w tym węgla) 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. Orkę można zastąpić powierzchniowym spulchnianiem gleby i precyzyjnym siewem (tzw. **uprawa bezorkowa**). W ogrodnictwie i sadownictwie receptą jest **permakultura**, czyli trwała uprawa bez naruszania struktury gleby. Inna ważna koncepcja to **agroleśnictwo**, czyli łączenie na jednym obszarze upraw rolnych z regeneracją lasów, co znacząco zwiększa możliwości akumulacji węgla, a jednocześnie ogranicza wysychanie gleb i poprawia warunki mikroklimatyczne.



Uprawa bezorkowa:
więcej informacji na stronie
www.bezpluga.pl

No-till sposobem na poprawę stanu gleby



Permakultura:
więcej informacji na stronie
<http://naturalnie.love/czym-jest-permakultura/>



Agroleśnictwo:
więcej informacji na stronie
www.agroekologia.edu.pl

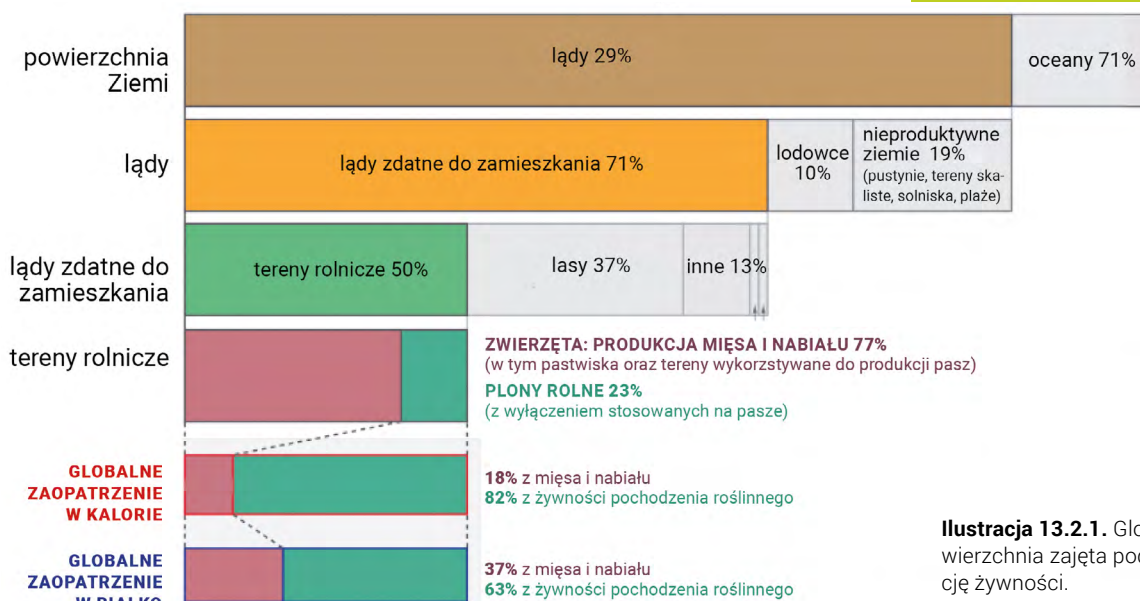
Agroleśnictwo – czym jest i dlaczego go potrzebujemy

PO CZWARTE: ZMIANA DIETY

Do opisanych zmian proklimatycznych w rolnictwie trzeba dodać konieczność znaczącego zmniejszenia hodowli zwierząt, a w szczególności bydła i owiec, która generuje duże emisje metanu i dwutlenku węgla (podrozdział 3.3.). Wymaga to istotnych zmian diety, polegających na ograniczeniu spożycia mięsa i nabiału. Aż 77% gruntów rolniczych przeznaczonych jest na produkcję zwierzęcą – są to pastwiska, łąki kośne albo uprawy roślin pastewnych (ilustracja 13.2.1.). Dieta zdominowana przez mięso to przywilej stosunkowo niewielkiej części globalnej populacji. Gdybyśmy z niego zrezygnowali, powierzchnia zajęta pod obszary rolnicze mogłaby być znacznie mniejsza. Uzyskalibyśmy w ten sposób tereny do regeneracji naturalnych ekosystemów akumulujących węgiel i przywracających szerzej ujętą równowagę przyrodniczą, a przy okazji ograniczenie ilości spożywanego mięsa zdecydowanie poprawiłoby nasze zdrowie i jakość życia.

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

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.



Ilustracja 13.2.1. Globalna powierzchnia zajęta pod produkcję żywności.

Źródło: Our World in Data, 2019.

CIEKAWIE!

Jeśli porównać ślad węglowy różnych rodzajów diety, to jest on oczywiście najniższy w przypadku diety wegańskiej, ale już w przypadku diety wegetariańskiej zawierającej duże ilości nabiału znacząco rośnie i przewyższa ślad węglowy diety uwzględniającej wieprzowinę i drób, przy eliminacji wołowiny i nabiału (Searchinger i in., 2018).

Wśród pomysłów na nowe źródła białka zwierzęcego wymienia się szerokie wprowadzenie do diety bezkręgowców, zwłaszcza owadów, a także produkcję sztucznego mięsa z wyhodowanych w laboratoriach tkanek zwierzęcych.

Koncepcją łączącą restytucję ekosystemów z produkcją nowych rodzajów żywności jest uprawa jadalnych glonów w przybrzeżnych przeżyźnionych wodach morskich. Dopływający do mórz rzekami nadmiar azotanów i fosforanów jest skutecznie pochłaniany przez uprawiane w wodzie glony, z których można wytwarzać żywność (mają dużą zawartość białka) albo które można stosować jako paszę dla zwierząt. Co ciekawe, krowy karmione paszą z dodatkiem wodorostów wytwarzają w czasie trawienia znacznie mniej metanu niż przy diecie tradycyjnej (Roque i in., 2019).



Dla zainteresowanych:
biotechnologia.pl

Mięso z laboratorium – nadzieja na przyszłość bez cierpienia zwierząt?



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 tych 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 z jednej strony 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 ze wzrostem swojej wielkości stają się coraz mniej odporne na zaburzenie funkcjonowania systemu dostaw. **Dlatego kolejnym ważnym kierunkiem adaptacji do zmiany klimatu w miastach jest częściowe przynajmniej uniezależnienie się od tych dostaw. Jednym z takich kierunków jest miejskie ogrodnictwo i rolnictwo.**

O dobrych praktykach związanych z adaptacją miast do zmiany klimatu przeczytasz na stronie projektu **Adaptcity** www.adaptcity.pl

Na stronie tego projektu dostępny jest raport przygotowany dla Warszawy:

Strategia adaptacji do zmian klimatu dla m.st. Warszawy do roku 2030 z perspektywą do roku 2050

**WSKAZÓWKA
NA PRZYSZŁOŚĆ**

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 oraz ptaków regulujących m.in. liczebność owadów.



Unsplash; Anna Earl

MAGDALENA BUDZISZEWSKA

ORCID 0000-0002-1837-2086
Uniwersytet Warszawski

ZBIGNIEW BOHDANOWICZ

ORCID 0000-0002-5430-0485
Uniwersytet Warszawski

ALEKSANDRA ŚWIDERSKA

ORCID 0000-0001-7252-4581
Uniwersytet Warszawski

13.3. 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: **działania indywidualne** i **działania zbiorowe**. W pewnym uproszczeniu te pierwsze dotyczą sposobów postępowania w sferze prywatnej, najczęściej zachowań konsumenckich, i można je podejmować samodzielnie. Te drugie dotyczą najczęściej sfery publicznej i wymagają współdziałania z innymi ludźmi. Mają one zwykle 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.

Przyjrzymy się bliżej tym dwóm rodzajom działania i złożonym zależnościom 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. sposobów 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. żywności z upraw ekologicznych), oraz minimalizowanie ilości odpadów.

Działania indywidualne wywierają bezpośredni wpływ na klimat, ale jest on niewielki. Aby ten wpływ był zauważalny, znaczny odsetek ludzi w społeczeństwie globalnym musiałby wprowadzić znaczące zmiany w swoim stylu życia (Stern, 2000). Jest to mało prawdopodobne, ponieważ działania indywidualne na masową skalę napotykają bariery, o których wiesz już z podrozdziału 6.3. W praktyce konsumenci mogą kupić tylko to, co jest dostępne w sklepach, a styl życia jest silniej determinowany miejscem zamieszkania, majątkiem i aktualną sytuacją życiową niż indywidualnymi wyborami.



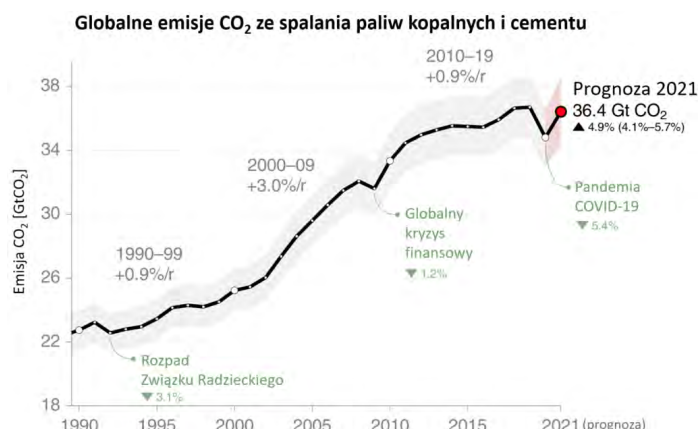
Unsplash; Sylvie Tittel

Odnotowany w 2020 roku spadek emisji CO₂ z powodu pandemii wirusa COVID-19 wyniósł ok. 5,4%. 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. Niestety, spadek emisji w związku z pandemią został w kolejnym roku zniwelowany ponownym ich wzrostem. Pokazuje to, że ograniczanie emisji w drodze kryzysu jest nieskuteczną drogą. Powinniśmy dążyć do wdrożenia trwałych, przemysłanych zmian, które w ciągu kilku dekad doprowadzą do transformacji energetyki, rolnictwa, metod produkcji towarów.

Dynamikę zmian emisji w związku z pandemią możesz prześledzić na ilustracji 13.3.1.

Ilustracja 13.3.1. Dynamika zmian emisji w związku z pandemią COVID-19.

Źródło: <https://www.global-carbonproject.org/carbonbudget/21/infographics.htm>; tłumaczenie grafiki: Nauka o klimacie.



Dla zainteresowanych:
naukaoklimacie.pl

Global Carbon budget 2021
– przegląd światowych emisji CO₂



Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych wynikających 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, których skutki nie zostały udowodnione. 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 negatywny wpływ na klimat jest największy. Słowo *greenwashing* można by przełożyć na język polski jako „ekościemę”, choć zapewne nie jest to najbardziej fortunne tłumaczenie angielskiego idiomu. Stosowanie takich strategii marketingowych sprawia, że konsumentom trudno wybrać zachowania, które rzeczywiście byłyby korzystne dla środowiska. Na przykład 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 problemów. Tymczasem podmioty niespecjalnie dbające o środowisko chętnie prowadzą takie działania.

**WSKAZÓWKI
NA PRZYSZŁOŚĆ**

Strategia odwracania uwagi polega zwłaszcza na pomijaniu problemu odejścia od spalania paliw kopalnych, co jest kluczowe dla walki z kryzysem klimatycznym: bez tego nie mamy szans na jego zahamowanie.

Niektóre popularne dyskursy ekologiczne, dotyczące na przykład zbierania śmieci czy sadzenia lasów, mogą stanowić zasłonę dymną wobec braku prawdziwych systemowych rozwiązań. Pytanie o to, czy strategie te stosuje się z naiwności i dobrej woli, czy też podejmuje się je celowo, pozostaje otwarte. Z całą pewnością jednak do sytuacji, gdy maluje 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 odcedzaniu komara, a połykaniu wielbłąda.

DZIAŁANIA ZBIOROWE

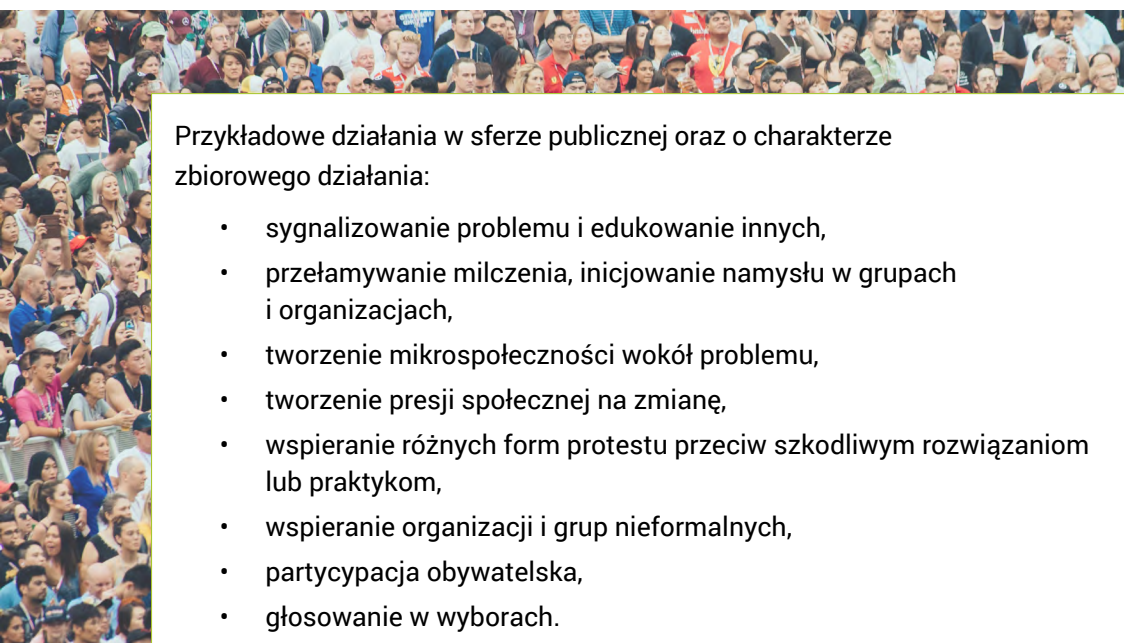
W sferze publicznej można aktywnie angażować się w prace prośrodowiskowych organizacji lub ruchów społecznych. W obliczu kryzysu klimatycznego wiele takich ruchów tworzy się oddolnie na całym świecie. **Niezwykle ważną zaletą działań w sferze publicznej jest to, że zwiększają one społeczną świadomość danego problemu** (Stern, 2000). I chociaż wpływają na klimat tylko pośrednio, są nakierowane na doprowadzenie do transformacji systemowej, bez której zatrzymanie zmiany klimatu nie jest możliwe.

Przykładowe działania w sferze publicznej oraz o charakterze zbiorowego działania:

- sygnalizowanie problemu i edukowanie innych,
- przełamywanie milczenia, inicjowanie namysłu w grupach i organizacjach,
- tworzenie mikrospołeczności wokół problemu,
- tworzenie presji społecznej na zmianę,
- wspieranie różnych form protestu przeciw szkodliwym rozwiązaniom lub praktykom,
- wspieranie organizacji i grup nieformalnych,
- partycypacja obywatelska,
- głosowanie w wyborach.

Granica między działaniami publicznymi a prywatnymi zaciera się, gdy ludzie osobiście kształtują działania organizacji i grup, do których należą. Na przykład inżynierowie mogą wprowadzać przyjazne środowisku rozwiązania techniczne w maszynach, które projektują. Mieszkańcy mogą wpływać na politykę swojej spółdzielni mieszkaniowej lub miejscowości. Takie zachowania odgrywają istotną rolę w powstrzymaniu zmiany, ponieważ najpoważniejsze problemy środowiskowe są skutkiem decyzji podejmowanych na najwyższych szczeblach władz lokalnych i globalnych (Stern, 2000).

Analizy prowadzone na podstawie międzynarodowych sondaży (Johannson Sevä i Kulin, 2018; Stern, 2000) potwierdzają, że w praktyce istnieje kilka różnych grup działań na rzecz środowiska. Są to działania indywidualne (konsumenckie) oraz 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 od różnych czynników. Na przykład podjęcie działań zbiorowych jest zależne od poziomu zaufania do innych i tzw. kapitału społecznego w danym kraju (Johannson Sevä i 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

Badania Werfela (2017) wykazały, że kiedy ludziom przypomina się o możliwości indywidualnych działań na rzecz klimatu (np. o oszczędzaniu energii w gospodarstwie domowym), stają się oni często nieco mniej skłonni do popierania strukturalnych polityk rządowych mających na celu ochronę klimatu.

W badaniu przeprowadzonym w Japonii i dotyczącym poparcia dla podatku węglowego część uczestników wypełniała ankiety przypominające o narodowej akcji *setsuden* (oszczędzanie elektryczności), a część miała również wymienić indywidualne działania prośrodowiskowe, których sami się podejmują (np. sortowanie śmieci). Okazało się, że osoby, którym o tych działaniach przypomniano, były mniej skłonne poprzeć podatek węglowy (Werfel, 2017). Badacze uważają, że świadomość działań indywidualnych prawdopodobnie „wypycha” poparcie dla zmiany systemowej, ponieważ ludzie odnoszą wrażenie, że skoro takie działania są prowadzone, to najpewniej wystarczą i nie potrzeba radykalnych zmian.

KOMUNIKACJA – WAŻNE OGNIWO MIĘDZY DZIAŁANAMI INDYWIDUALNYMI A ZBIOROWYMI

Jakie jest – z perspektywy jednostki – najskuteczniejsze 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) wykazali, że omawianie problemów klimatu w gronie bliskich osób może 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 jedne osoby informują kolejne i pomagają im zaangażować się w działanie (Besta i in., 2019). Próba samotnego stawienia czoła problemom cywilizacyjnym jest bardzo obciążająca psychicznie, natomiast działanie wspólnotowe w takiej samej sprawie może działać wspierająco (APS, 2019). Można by powiedzieć, że reagowanie na zmianę klimatu jest sportem zespołowym, a nie konkurencją indywidualną.



Dodatkowym czynnikiem utrudniającym adekwatną reakcję na kryzys klimatyczny w społeczeństwach demokratycznych jest 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 gotowi nie tylko zaakceptować niezbędne zmiany, ale też aktywnie się ich domagać ze świadomością wiążących się z nimi obciążeń. Może się to zdarzyć tylko wtedy, kiedy będzie się ich traktować nie jako bezmyślnych odbiorców bodźców ekonomicznych, lecz – jak w koncepcji ekonomii moralnej (Bowles, 2016) – jako jednostki skłonne w wielu sytuacjach wybrać działania etyczne i podjąć ze sobą aktywną współpracę, nawet jeśli pociągnie to za sobą wymierne koszty. W końcu stawka jest bardzo wysoka – między innymi przyszłość naszych dzieci.

W pewnej mierze takie przesunięcie społeczne już zachodzi. Badania z 2020 roku pokazują (APA, 2020), że większość mieszkańców Stanów Zjednoczonych uważa zmianę klimatu za najpoważniejszy obecnie problem. Podobne wyniki uzyskujemy globalnie (Brechin i Bhandari, 2011). Także w Polsce, o czym wiesz już z podrozdziału 6.2., większość osób zasadniczo jest świadoma wagi problemu, choć poziom niepokoju z reguły przewyższa poziom rzeczywistej wiedzy. Jak zapewne pamiętasz z tego samego podrozdziału, to poprawna wiedza o zmianie klimatu łączyła się w badaniach z chęcią podejmowania działania (Kantar, 2019). Widać więc, że potencjał sprawczy nie tylko bezpośredniej komunikacji na temat klimatu, ale i 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 tych dwóch krótkich filmach. Przydadzą się one we wszystkich rozmowach na trudne tematy.



Na platformie YouTube:
The Secret to talking about climate change

<https://www.thecut.com/2016/11/how-to-talk-about-climate-change-so-anyone-will-listen.html>



Więcej o krytyce podejścia uwzględniającego wyłącznie działania indywidualne można przeczytać między innymi w tekście Derricka Jensena:

www.nowyobywatel.pl

Ułuda krótkiego prysznicza

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 problem 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:

www.krytykapolityczna.pl

Koronawirus a złożoność: trzy lekcje z ekonomii

Podział rynek–państwo–społeczeństwo wydaje się anachronizmem wobec kryzysów, które wymagają wszelakiej, skomplikowanej i wielopoziomowej współpracy.

Z tekstu Karoliny Safarzyńskiej

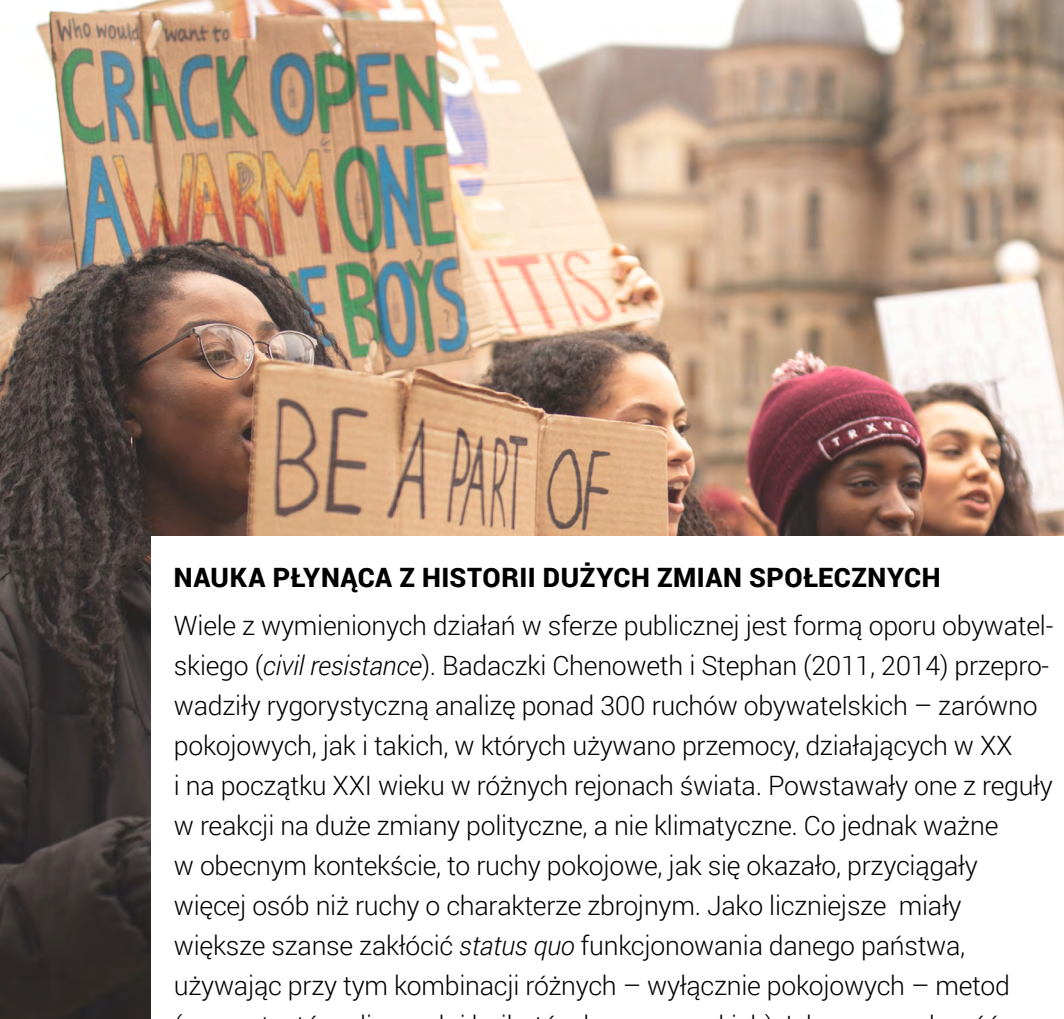
ROLA DZIAŁAŃ INDYWIDUALNYCH W TWORZENIU WZORCÓW I NORM ETYCZNYCH

Dyskusja na temat wzajemnych związków działań indywidualnych i zbiorowych jest złożona. Pojawiają się w niej różne głosy – z dwoma różnymi stanowiskami możesz się zapoznać, sięgając do rekomendowanych obok artykułów.

Zapewne połączenie tych perspektyw jest możliwe dzięki zastosowaniu metod psychologii społecznej. W badaniu dotyczącym osób świadomie redukujących swój własny ślad węglowy (Howell, 2013) wykazano, 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 działań indywidualnych jest nie tyle redukcja śladu węglowego, ile ich rola w tworzeniu normy etycznej, dawaniu przykładu i demonstrowaniu nowych postaw we własnym środowisku. To samo się dzieje, kiedy jednostki tworzą swoimi zachowaniami normę angażowania się w życie publiczne, choćby przez uczestnictwo w manifestacjach czy członkostwo w ruchach społecznych. Wiele osób podejmujących taką aktywność ma w swoich rodzinach i wśród znajomych osoby, które postępują podobnie. To właśnie takie sieci społeczne ułatwiają trwałe zaangażowanie (Besta i in., 2019).

Samuel Bowles (2016) w książce *The Moral Economy: Why Good Incentives Are No Substitute for Good Citizens* (Ekonomia moralna: Dlaczego dobre zachęty nie zastąpią dobrego obywatela) podkreśla, że wprowadzenie samych zachęt ekonomicznych czy kar nie wystarczy, 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 norm czy zasad moralnych. Reagowanie na kryzys klimatyczny ma niewątpliwie wymiar etyczny. W końcu od tego zależy bezpośrednio przyszłość naszych dzieci i i szansa na uniknięcie katastrofy humanitarnej o skali bez precedensu w historii ludzkości. Powstrzymanie zmiany klimatycznej to ogromne wyzwanie, być może największe dla wszystkich nas współcześnie żyjących. 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 wprowadzanie. I jedno, i drugie mogą się wtedy stać ważnym wspólnym krokiem we właściwym kierunku.



NAUKA PŁYNĄCA Z HISTORII DUŻYCH ZMIAN SPOŁECZNYCH

Wiele z wymienionych działań w sferze publicznej jest formą 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, działających w XX i na początku XXI wieku w różnych rejonach świata. Powstawały one z reguły w reakcji na duże zmiany polityczne, a nie klimatyczne. Co jednak ważne w obecnym kontekście, to ruchy pokojowe, jak się okazało, przyciągały więcej osób niż ruchy o charakterze zbrojnym. Jako liczniejsze 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, przywódców religijnych czy przedstawicieli mediów. W rezultacie ruchy pokojowe dwa razy częściej osiągały swój cel niż ruchy zbrojne (Chenoweth i Stephan, 2014). Autorki omawiają też m.in. naszą „Solidarność”, która pokojowo doprowadziła do upadku komunizmu w Polsce i spełniła omawiane przez autorki warunki – była 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 osiągnięcie sprzed zaledwie niewiele ponad 100 lat (obowiązuje dopiero od 1918 roku). Co ciekawe, zmiany tego rodzaju mogą zachodzić szybko i skokowo. Daje to nadzieję na przyszłość, bo pokazuje, że gdy sytuacja tego wymaga, społeczeństwa potrafią błyskawicznie i trwale zmienić sposób działania, odrzucając zasady, które wcześniej wydawały się nienaruszalne. Dlatego, mimo że jest już bardzo późno, nie wiemy, w jaki sposób będzie kształtować się przyszłość klimatu. W tej sprawie wiele zależy od tego, co ostatecznie zrobią poszczególne osoby i całe społeczeństwa.



Unsplash; Callum Shaw

Ile mamy czasu? Wpływ ludzi na klimat i środowisko naturalne jest z każdym rokiem coraz większy. Świadomość skali tych zmian i tego, że stale postępują, może być przytłaczająca. Niektórzy dochodzą do wniosku, że czas na skuteczne przeciwstawianie się tym procesom już minął, że odwrócenie niekorzystnych zmian nie jest już możliwe. Taka reakcja może być zrozumiała, ale fakty nie potwierdzają takiej oceny. Pomimo dodatnich 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 podrozdziale 1.4.) mówimy tu o prawdopodobieństwie. Nie możemy zatem określić, kiedy dokładnie próg planetarny zostanie przekroczony. Dowiemy się o tym po fakcie. Dopóki to nie nastąpiło, dopóty cały czas mamy szansę na obniżenie ryzyka.

Zarówno dziś, jak i w kolejnych dziesięcioleciach to decyzje ludzi będą w największym stopniu kształtować klimat, ludzie więc mogą te zmiany i potęgować, i zmniejszać.



PODSUMOWANIE ZMIANA KLIMATU: 25 PYTAŃ I ODPOWIEDZI

przygotowanych przez naukowców współpracujących z zespołem Uniwersytetu Warszawskiego dla Klimatu: dr Magdalenę Budziszewską, dr. Jakuba Jędraka, dr Aleksandrę Kardaś oraz prof. Szymona Malinowskiego

1. Czy klimat Ziemi naprawdę się ociepla?

Tak. Pokazują to pomiary temperatury. Mamy do dyspozycji m.in. dane ze stacji meteorologicznych na lądach, z 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 ok. 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.

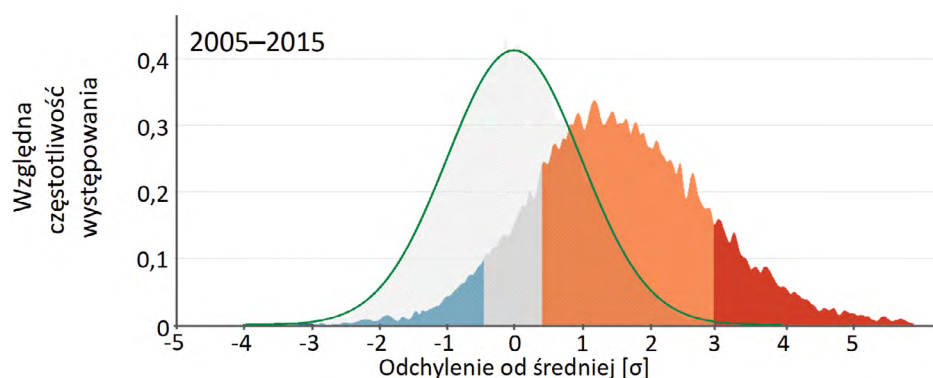
4. „Globalne ocieplenie” czy „zmiana klimatu”?

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 ilustracji P.1. widać, jak zmieniły się częstotliwości występowania różnych temperatur powietrza nad lądami półkuli północnej (dane dla dekady 2005–2015 w porównaniu do lat 1951–1980).



Ilustracja P.1. Zmiany częstotliwości występowania różnych temperatur nad lądami na półkuli północnej w latach 2005–2015.

Źródło: Popkiewicz, Kardaś i Malinowski, 2019.

6. Wciąż jednak zdarzają się 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 „atakam zimy”. Jednocześnie w innych regionach często występują wtedy temperatury wyższe od średniej.

7. Jak szybko zmienia się klimat Polski?

W naszym kraju w ciągu ostatnich 30–40 lat średnia temperatura wzrosła już przynajmniej o ok. 2°C. Średnia temperatura dla obecnego terytorium Polski w latach 1851–1900 wynosiła 7,2°C. W roku 2019 – już 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 zajęło miliony 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.

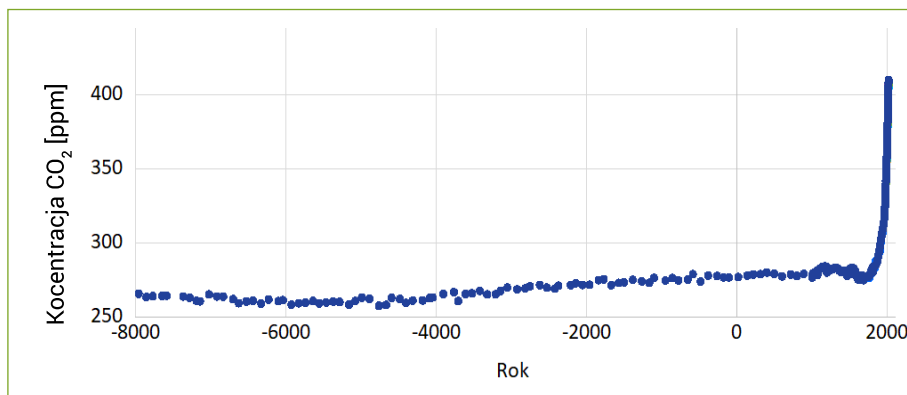
Jest to kolejne z najczęstszych nieporozumień. Emisje, których źródłem są m.in. przemiana materii w organizmach żywych, rozkład materii organicznej czy oceany, stanowią część cyklu, który jest zasadniczo zrównoważony. Natura uwalnia mniej więcej tyle samo CO_2 , co pochłania. Natomiast ludzie, spalając paliwa kopalne, każdego roku wprowadzają do atmosfery dodatkową, niezbilansowaną ilość CO_2 . To ta kumulująca się nadwyżka odpowiada za zmianę klimatu.

11. 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 CO_2 w atmosferze?

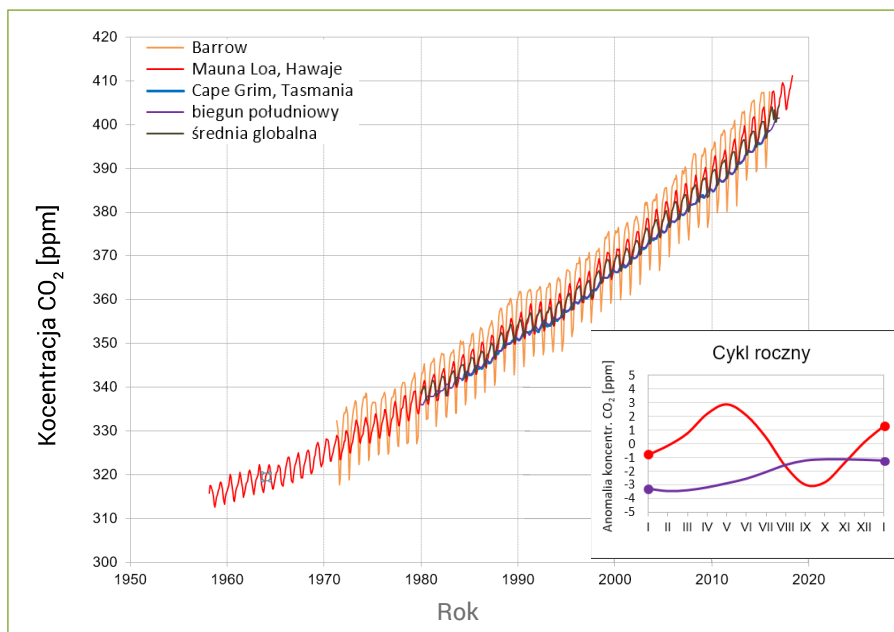
Do połowy XVIII wieku koncentracja CO_2 w atmosferze wynosiła ok. 280 ppm (części albo cząsteczek na milion), natomiast obecnie jest to już ok. 410 ppm (średnia roczna). Chodzi tu o stężenie tła, mierzone z dala od wszelkich źródeł emisji CO_2 .



Ilustracja P.2. Zmiany koncentracji CO_2 w skali kilku tysięcy lat.

Źródło: Popkiewicz, Kardaś i Malinowski, 2019.

Od końca XVIII wieku stężenie tła CO_2 w atmosferze stale jednak rośnie, szczególnie szybko w ciągu kilku ostatnich dekad:



Ilustracja P.3. Zmiany koncentracji CO_2 w skali kilkudziesięciu lat mierzone w kolejnych miesiącach w obserwatoriach Mauna Loa na Hawajach, Barrow na Alasce, Cape Grim w Tasmanii i na biegunie południowym oraz średnia globalna. W ramce w prawym dolnym rogu przedstawiono cykl roczny na Mauna Loa i biegunie południowym (0 odpowiada średniej rocznej na Mauna Loa): uśrednione dane dla kolejnych miesięcy w latach 2006–2015 wskazują, że w tej dekadzie średni wzrost stężenia CO_2 w obu miejscach wynosił ponad 2 ppm.

Źródło: Popkiewicz, Kardaś i Malinowski, 2019.

Za wyraźnie widoczne, regularne oscylacje poziomu CO_2 w ciągu roku odpowiadają sezonowe zmiany pochłaniania tego gazu związane z okresem wegetacyjnym na półkuli północnej.

Od początku rewolucji przemysłowej wyemitowaliśmy więcej CO_2 , niż było go początkowo w atmosferze. To, że stężenie CO_2 wzrosło w tym czasie zaledwie o ok. 50%, zawdzięczamy temu, że część wyemitowanego CO_2 jest pochłanianą przez oceany, roślinność i glebę.

13. Jaki wpływ na stężenie CO_2 w powietrzu wywierają oceany?

Morza i oceany pochłaniają obecnie z atmosfery więcej CO_2 , niż go do niej emitują. Wraz ze wzrostem temperatury sytuacja ta może, niestety, ulec zmianie – w cieplejszej wodzie rozpuszczalność CO_2 jest mniejsza.

14. Czy nadmiar CO_2 w atmosferze ma jeszcze jakieś konsekwencje poza wpływem na klimat?

W niedalekiej przyszłości rosnące stężenie CO_2 w powietrzu, którym oddychamy, będzie negatywnie wpływać na nasze samopoczucie i sprawność intelektualną – tak jak jest w dusznym, niewietrzonym pomieszczeniu. Im wyższe stężenie tła CO_2 , tym trudniej będzie zapewnić dobrą jakość powietrza (niskie stężenie CO_2) w rejonach miejskich i wewnątrz budynków.

Szybkie rozpuszczanie się dużych ilości CO_2 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), 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. Wzrost jej ilości w atmosferze wynika wyłącznie z ocieplenia klimatu. 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. Pomiary zaś 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 ogrzewanie powierzchni lądów i atmosfery. Ilość energii trafiająca do oceanów jest ogromna – w każdej sekundzie odpowiada energii wyzwolonej podczas wybuchu czterech 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. 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. Brak wody z topiącego się po zimie śniegu i zwiększone przez wyższe temperatury parowanie sprawiają jednak, 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?

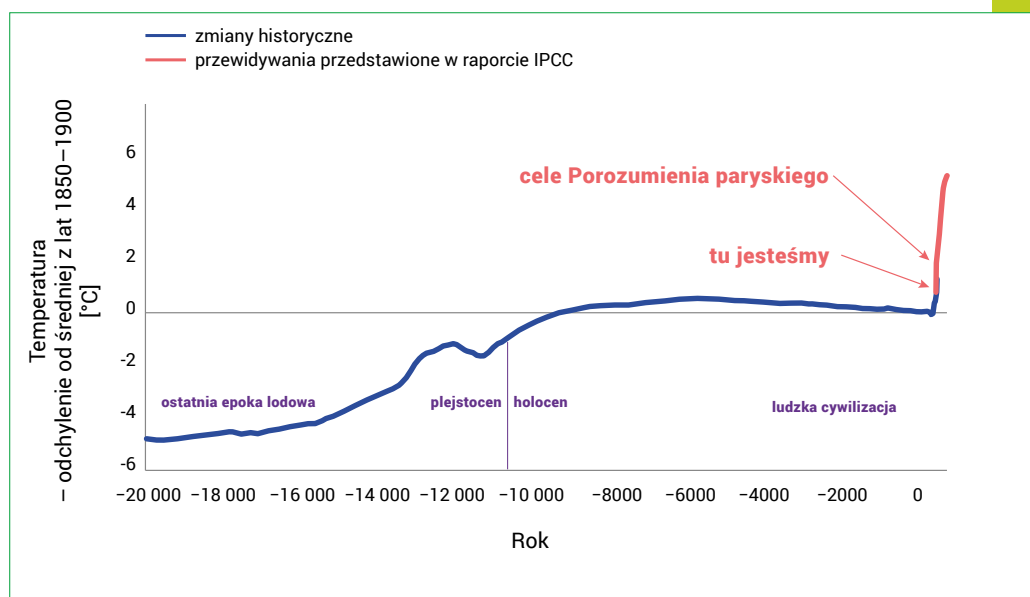
To zjawiska występujące w odpowiedzi na zmianę klimatu, mogące ją wzmacniać lub osłabiać. Na przykład topniejąca wieloletnia zmarzlina uwalnia dwutlenek węgla i metan, co zwiększa stężenia tych gazów cieplarnianych w atmosferze i powoduje szybsze ocieplenie się klimatu. Obecnie większość działających 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 (*tipping point*) to taki stan ziemskiego klimatu, po osiągnięciu którego rozpoczyna się jakiś praktycznie nieodwracalny proces, wpływający na system klimatyczny. Jeśli na przykład 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 ok. 4°C niższa niż współcześnie, nasza planeta znajdowała się w maksimum ostatniej epoki lodowej (ilustracja P.4.), a większa część obecnego terytorium Polski była pokryta kilkusetmetrową warstwą lodu.



Wzrost temperatury o kilka stopni w stosunku do holocenu – okresu stabilnego klimatu, w którym rozwinęła się ludzka cywilizacja – pociągnie za sobą wystąpienie na Ziemi warunków skrajnie różnych od tych, które znamy. Procesy te zachodzą w szybkim tempie, utrudniając przystosowanie się do nich. Co więcej, jeśli ocieplenie przekroczy pewną wartość krytyczną, to dalej będzie postępowało samo, nawet jeśli całkowicie przestaniemy emitować gazy cieplarniane. W takim scenariuszu Ziemia stałaby się na większości swojego obszaru niezdatna do zamieszkania dla ludzi.

25. Co powinniśmy zrobić, by zatrzymać zmianę klimatu?

Musimy przeorganizować wszystkie nasze działania i dziedziny życia tak, aby nie wiązały się z emisjami gazów cieplarnianych. W szczególności musimy przestać spalać paliwa kopalne i zmienić sposób produkcji żywności. Musimy też pilnie otoczyć ochroną przyrodę, w tym oceany, żeby złagodzić destrukcyjny wpływ naszej cywilizacji i zmiany klimatu na ekosystemy. Na te wszystkie działania mamy, niestety, mało czasu.

Ilustracja P.4. Szacunkowe zmiany średniej temperatury powierzchni Ziemi w porównaniu do średnich w latach 1850–1900 [°C]. Holocen cechował się stosunkowo stabilnym klimatem, umożliwiającym rozwój rolnictwa i rozkwit ludzkiej cywilizacji.

Na podstawie: Popkiewicz, 2022; dane za IPCC.



BIBLIOGRAFIA

WSTĘP

IPCC (2018). Summary for Policymakers. W: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, ... T. Waterfield (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* (s. 3–24). Pobrane z <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).

Pachauri, R.K., Allen, M.R., Barros, V.R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... 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*. Genève: IPCC.

ROZDZIAŁ 1

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., Schellnhuber, H.J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793. doi: 10.1073/pnas.0705414105.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). *Nauka o klimacie*. Warszawa: Wydawnictwo Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.

Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., ... Schellnhuber, H.J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115.

Wild, M. i in. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... 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, New York: Cambridge University Press.

ROZDZIAŁ 2

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), 1633–1637. doi: 10.1016/0016-7037(96)00104-4.

Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., ... Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, D., G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... 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. 465–570). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Denman, K.L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P.M., Dickinson, R.E., ... Zhang, X. (2007). Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. W: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.M. Miller (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, New York: Cambridge University Press.

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., ... Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.

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).

Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., ... Williams, B. (2012). The Geological Record of Ocean Acidification. *Science*, 335, 1058–1063. doi: 10.1126/science.1208277.

Lee, C.-T.A., Jiang, H., Dasgupta, R., Torres, M. (2019). A Framework for Understanding Whole-Earth Carbon Cycling. W: Orcutt, B.N., R. Dasgupta (red.), *Deep Carbon: Past to Present* (s. 313–357). Cambridge, New York: 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, 2–17. doi: 10.1002/2014GB005074.

Myhre, G., Shindell, D., Bron, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., ... Zhang, H., (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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* (659–703). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Nichols, J.E., Peteet, D.M. (2019). Rapid expansion of northern peatlands and doubled estimate of carbon storage. *Nature Geoscience*, 12, 917–921. doi: 10.1038/s41561-019-0454-z.

Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). *Nauka o klimacie*. Warszawa: Wydawnictwo Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.

Ruesch, A., Gibbs, H.K. (2008). *New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Pobrane z <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov> (dostęp: 09.01.2020).

World Meteorological Organization (2019). The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere. Based on Global Observations through 2018. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, 15, 1–8. Pobrane z https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620 (dostęp: 18.01.2020).

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, L13402-1–L13402-5. doi: 10.1029/2010GL043584.

ROZDZIAŁ 3

Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., ... Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... 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. 465–570). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Engineering ToolBox, (2009). Combustion of Fuels – Carbon Dioxide Emission. Pobrane z https://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html (dostęp 21.02.2022).

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., ... Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.

Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Hauck, J., ... Zeng, J. (2022). Global Carbon Budget 2021, *Earth System Science Data*, 14, 1917–2005, doi:10.5194/essd-14-1917-2022.

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B. (2013). *Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Pobrane z <http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf> (dostęp: 20.01.2020).

Global Carbon Project (2021). Carbon Budget 2021. Pobrane z <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/21/presentation.htm> (dostęp: 18.12.2021).

IPCC (2014). Summary for Policymakers. W: IPCC [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, J.C. Minx (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* (s. 1–32). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, ... 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. 659–740). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

PBL Netherlands 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 Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.

Saunio, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., ... Zhuang, Q. (2019). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1–36. doi: 10.5194/essd-2019-128.

Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., ... Tiwari, G. (2014). Transport. W: IPCC [Edenhofer O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ... J.C. Minx (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* (s. 599–670). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

United Nations Environment Programme (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. Nairobi, Kenia: UNEP. Pobrane z <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021> (dostęp: 07.12.2021).

World Meteorological Organization (2018). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring*. Genève. Pobrane z <http://ozone.unep.org/science/assessment/sap> (dostęp: 19.01.2020).

World Meteorological Organization (2021). The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020. *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, 17, 1–10. Pobrane z https://library.wmo.int/index.php?vl=notice_display&id=21975 (dostęp: 18.01.2020).

ROZDZIAŁ 4

Ansari, S. (Shaz), 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. doi: 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, 1243–1248. doi: 10.1126/science.162.3859.1243.

Tol, R.S.J. (2014). *Climate Economics. Economic Analysis of Climate, Climate Change and Climate Policy*. Amsterdam: Edward Elgar Publishing.

ROZDZIAŁ 5

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), 5588–5598. doi: 10.1002/2014GL060962.

Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., ... Vazquez Aguirre, J.L. (2006). Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 11(D5), D05109-1–D05109-22. doi: 10.1029/2005JD006290.

Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Landa, C.S., Metzl, N., O'Brien, K.M., Olsen, A., ... 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, 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), 1–13. doi: 10.1029/2001GC000264.

Brindley, H.E., Bantges, R.J. (2016). The Spectral Signature of Recent Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 2(3), 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), 323–354. doi: 10.2138/rmg.2013.75.1.

Ciais, P., Sabine C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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. 465–570). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Dragukheny, E., Tans, P. (2020) *Trends in atmospheric carbon dioxide*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). Pobrane z <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (dostęp: 24.02.2020).



BIBLIOGRAFIA

- 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, 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), 1196–1203. doi: 10.1002/2016GL071866.
- EPA (2016). *Climate Change Indicators: Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases*. Pobrane z <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, 339–343. doi: 10.1038/nature14240.
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Hauck, J., Peters, G.P., ... Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.
- Gerlach, T. (2011) Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. *EOS*, 92(24), 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, 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., ... Zhai, P.M. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-G. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.Xia, V. Bex, 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, New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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, New York: Cambridge University Press.
- IPCC [Shukla, P.R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.S. Roberts, ... J. Malley (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*. Pobrane z <https://www.ipcc.ch/srcl/> (dostęp: 24.02.2020).
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., ... Verchot, L. (2019). Land-climate interactions. W: IPCC [Shukla, P.R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, ... J. Malley (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* (s. 131–247). Pobrane z 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. doi: 10.1111/j.2153-3490.1976.tb00701.x.
- Kopp, G., Lean, J.L. (2011). A new, lower value of Total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 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., ... Zweng, M.M. (2012). World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, 39(10), 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, 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, 95–116.
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J.F., ... Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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. 383–464). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2021) *Climate Change: Ocean Heat Content*. Pobrane z <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-ocean-heat-content> (dostęp: 17.02.2022).
- Popkiewicz, M. (2013). *Mit: Dwutlenek węgla emitowany przez człowieka nie ma znaczenia*. Pobrane z <https://naukaoklimacie.pl/fakty-i-mity/mit-dwutlenek-wegla-emitowany-przez-czlowieka-nie-ma-znaczenia-31?t=2>. (dostęp: 24.02.2020).
- Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). *Nauka o klimacie*. Warszawa: Wydawnictwo Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.
- Ramaswamy, V., Chanin, M.L., Angell, J., Barnett, J., Gaffen, D., Gelman, M., ... Swinbank, R. (2001). Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations. *Reviews of Geophysics*, 39(1), 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, 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, 49–54. doi: 10.1038/nature10915.
- Tans, P. (2020). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (ESRL), USA. Pobrane z <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>, (dostęp: 24.02.2020).
- Tyndall, J. (1872). *Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat*. London: 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, 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, 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, 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. *Astronomy & Astrophysics*, 620, A120–A120–12. doi: 10.1051/0004-6361/201832956.

Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R.B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.G., ... Zeng, N. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6, 791–795. doi: 10.1038/nclimate3004.

ROZDZIAŁ 6

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. doi: 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.

Australian Psychological Society. (2019). *The Climate Change Empowerment Handbook*. Pobrane z <https://psychology.org.au/getmedia/b2304d9c-64d4-40a6-b063-3014128ec740/activate-climate-change.pdf> (dostęp: 10.05.2020).

Centrum Badań Opinii Społecznej (CBOS) (2016). *Stan środowiska i zmiany klimatu. Komunikat z badań nr 39*. Pobrane z <https://www.teraz-srodowisko.pl/media/pdf/aktualnosci/3005-CBOS-klimat.pdf> (dostęp: 10.05.2020).

Cialdini, R.B., Reno, R.R., Kallgren, C.A. (1990). A focus theory of normative conduct: Recycling the concept of norms to reduce littering in public places. *Journal of Personality and Social Psychology*, 58(6), 1015.

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. (red.), *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., R.B. Norgaard, D. Schlosberg (red.), *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*. doi: 10.21338/nsd-ess-cumulative.

Gifford, R. (2011). The Dragons of Inaction: Psychological Barriers that Limit Climate Change Mitigation and Adaptation. *American Psychologist*, 66(4), 290–302. doi: 10.1037/a0023566.

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. doi: 10.1177/0013916595275005.

Gwiazda, M. (2016). *Polacy o przyszłości energetycznej kraju* (28/2016). Fundacja Centrum Badań Opinii Społecznej. Pobrane z https://www.cbos.pl/SPISKOM.POL/2016/K_028_16.PDF (dostęp: 10.05.2020).

Gwiazda, M., Kolbowska, A. (2009). *Polacy o zmianach klimatu* (14/2009). Fundacja Centrum Badań Opinii Społecznej. Pobrane z https://www.cbos.pl/PL/wydarzenia/03_konferencja/klimat.pdf (dostęp: 10.05.2020).

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. doi: 10.1016/j.jenvp.2018.03.001.

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. doi: 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). *Ziemiańskie atakują! Kantar*. Pobrane z <https://ziemiańskieatakują.pl/> (dostęp: 10.05.2020).

Kundzewicz, Z.W. (2013). *Cieplejszy świat. Rzecz o zmianach klimatu*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.

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. doi: 10.5964/jsp.p.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(2), 77–108.

National Center for Science Education (2016). *Why is it called denial?* Pobrane z <https://ncse.ngo/why-it-called-denial> (dostęp: 10.05.2020).

Norgaard, K.M. (2006). "People Want to Protect Themselves a Little Bit": Emotions, Denial, and Social Movement Nonparticipation. *Sociological Inquiry*, 76, 372–396. doi: 10.1111/j.1475-682X.2006.00160.x.



BIBLIOGRAFIA

- 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*. New York: Bloomsbury Press.
- Pew Research Center. (2019). *Climate Change Still Seen as the Top Global Threat, but Cyberattacks a Rising Concern* (202.419.4372). Pobrane z https://www.pewresearch.org/global/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/Pew-Research-Center_Global-Threats-2018-Report_2019-02-10.pdf (dostęp: 10.05.2020).
- Ripple, W.J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., Moomaw, W.R. (2019). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8–12. doi: 10.1093/biosci/biz088.
- Roguska, B. (2014). *Opinie o bezpieczeństwie narodowym* (18/2014). Centrum Badań Opinii Społecznej. Pobrane z https://www.cbos.pl/SPISKOM.POL/2014/K_018_14.PDF (dostęp: 10.05.2020).
- 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(5), 429–434. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.01917.x.
- Stern, P.C. (2012). Psychology: Fear and hope in climate messages. *Nature Climate Change*, 2(8), 572–573. doi: 10.1038/nclimate1610.
- Stern, P.C. (2000a). Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior. *Journal of Social Issues*, 56(3), 407–424. doi: 10.1111/0022-4537.00175.
- Stern, P.C. (2000b). Psychology, Sustainability, and the Science of Human-Environment Interactions. *American Psychologist*, 55(5), 523–530. doi: 10.1037/0003-066X.55.5.523.
- Stern, P.C., Gardner, G.T. (1981). The place of behavior change in managing environmental problems. *Zeitschrift für Umweltpolitik*, 2, 213–239.
- Stoknes, P.E. (2015). *What we Think About When We Try Not To Think About Global Warming: Toward a New Psychology of Climate Action*. Chelsea: Green Publishing.
- 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: 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. (Raport o docieraniu z przekazem do grupy docelowej Life Wzrost.PL)*. WWF Polska. Pobrane z <https://energiaodnawia.pl/wp-content/uploads/2017/01/2-Raport-o-docieraniu-z-przekazem-do-grupy-docelowej.pdf> (dostęp: 10.05.2020).
- Franciszek (2015). *Laudato Si*. Przekład polski. Pobrane z https://www.vatican.va/content/dam/francesco/pdf/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si_pl.pdf (dostęp: 20.03.2020).
- Johnston, H.S. (1971). Reduction of Stratospheric Ozone by Nitrogen Oxide Catalysts from Supersonic Transport Exhaust, *Science*, 173, 517–522.
- Keen, S. (2020). The appallingly bad neoclassical economics of climate change. *Globalizations*, 1, 1–29. doi: 10.1080/1477731.2020.1807856.
- Lea, R. (2006, 6 listopad). Personal view: Business should beware of green-clad fundamentalists, *The Telegraph*. Pobrane z <https://www.telegraph.co.uk/finance/2950203/Personal-view-Business-should-beware-of-green-clad-fundamentalists.html> (dostęp: 20.03.2020).
- Lomborg, B., (2006, 2 listopada), Stern review, *Wall Street Journal*. Pobrane z <https://www.wsj.com/articles/SB116243506287110986> (dostęp: 20.03.2020).
- 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. doi: 10.1002/(SICI)1099-0836(199711)6:5<276::AID-BSE123>3.0.CO;2-A.
- Mattauch, L., Cameron, H. (2016). Climate Policy When Preferences Are Endogenous – and Sometimes They Are. *Midwest Studies In Philosophy*, 40(1), 76–95. doi: 10.1111/misp.12048.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. III (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books: New York.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. III (1973). *Granice wzrostu*. Przekład W. Rączkowska, S. Rączkowski. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Molina, M.J., Rowland F.S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249, 810–812. doi: 10.1038/249810a0.
- 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. Pobrane z <https://ideas.repec.org/p/cwl/cwldpp/1009.html> (dostęp: 20.03.2020).
- Nordhaus, W.D. (2007). A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 686–702. doi: 10.1257/jel.45.3.686.
- Nordhaus, W.D. (2019). Can We Control Carbon Dioxide? (From 1975). *The American Economic Review*, 109(6), 2015–2035. doi: 10.1257/aer.109.6.2015.
- Nordhaus, W.D., Tobin, J. (1972). Is Growth Obsolete?. W: *Economic Research: Retrospect and Prospect*, Volume 5, *Economic Growth* (s. 1–80). New York: National Bureau of Economic Research.
- Ray, N., Adams, J.M. (2001). A GIS-based Vegetation Map of the World at the Last Glacial Maximum (25,000–15,000 BP). *Internet Archaeology*, 11(11). doi: 10.11141/ia.11.2.
- Ripple, W.J., Wolf, C., Newsome, T.M., Barnard, P., Moomaw, W.R. (2019). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8–12. doi: 10.1093/biosci/biz088.
- Solomon, S., Ivy, D.J., Kinnison, D., Mills, M.J., Neely, R.R., Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer, *Science*, 353, 269–274. doi:10.1126/science.aae0061.

ROZDZIAŁ 7

Carson, R. (1962). *The Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin Company.

Daly, H.E. (2005). Economics in a Full World. *Scientific American*, 293 (3), 100–107. doi: 10.1038/scientificamerican0905-100.

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. doi: 10.1038/315207a0.

Stern, N. (2006). *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Vol. 30. Cambridge: University Press Cambridge.

Żylicz, T., (2016). *Międzynarodowa współpraca ekologiczna*. Białystok: Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko.

ROZDZIAŁ 8

Bielec-Bąkowska Z., Taszarek M., Kolendowicz L. (2021) Change of Thunderstorms and Tornadoes. W: Falarz M. (red.), *Climate Change in Poland* (s. 421–441). Cham: Springer Climate. doi:10.1007/978-3-030-70328-8_16

Djaków, P. (2019). *Polskie lato 2019 – dziś rekordowo gorące, w przyszłości typowe lub wręcz chłodne?* Pobrane z <https://nauka.oklimacie.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 globasea level in 2010–2011. *Geophysical Research Letters*, 40, 4368–4373. doi: 10.1002/grl.50834.

Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., ... Yu, Y. (2021) Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. W: [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (red.)], *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 1211–1363). Cambridge, United Kingdom i New York: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.011.

Global Carbon Project (2016). Pobrane z <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/archive.htm> (dostęp: 16.03.2020).

Gutiérrez, J.M., Jones, R.G., Narisma, G.T., Alves, L.M., Amjad, M., Gorodetskaya, I.V., ... Zhou, B. (2021) (red.), Interactive Atlas, W: [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (red.)], *Atlas. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Pobrane z <http://interactive-atlas.ipcc.ch/> (dostęp 13.12.2021).

Hansen, J., Sato, M. (2016). *Public Perception of Climate Change and the New Climate Dice*. Pobrane z <http://www.columbia.edu/~mhs119/PerceptionsAndDice/>. (dostęp: 25.03.2020).

Hov, Ø., Cubasch, U., Fischer, E., Hölpe, P., Iversen, T., Kvamstø, N.G., ... Ulbrich, U. (2013). *Extreme Weather Events in Europe: preparing for climate change adaptation*. Cambridge: Banson. Pobrane z https://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/ExtremeWeather/ExtremeWeather_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).

IMGW-PIB (2021). *Klimat Polski 2020*. Pobrane z <https://www.imgw.pl/badania-nauka/klimat> (dostęp 14.12.2021).

IPCC (2013). Summary for Policymakers. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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. 1–24). Cambridge, New York: Cambridge University Press.

IPCC (2018). Summary for Policymakers. W: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O., Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, ... T. Waterfield. (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* (s. 3–24). Pobrane z <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).

IPCC (2021). Summary for Policymakers. W: IPCC [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (red.)], *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press (w druku).

Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Bedia, J., Cimadevilla, E., Díez-Sierra, J., ... Yelekçi, Ö. (2021). *Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas*. Zenodo, doi: 10.5281/zenodo.3691645. Pobrane z <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas> (dostęp: 06.02.2020).

Klimada (2020). *Tendencje do zmian klimatu*. Pobrane z <http://klimada.mos.gov.pl/zmiany-klimatu-w-polsce/tendencje-zmian-klimatu/> (dostęp: 02.40.2020).

Knutson, T., Camargo, S.J., Chan, J.C.L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., ... Wu, L. (2019a). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part I: Detection and Attribution. *Bulletin of American Meteorological Society*, 101, 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., ... Wu, L. (2019b). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of American Meteorological Society*, 101, E303-E322. doi: 10.1175/BAMS-D-18-0194.1.

Kopp, R.E., Kemp, A.C., Bittermann, K., Horton, B.P., Donnelly, J.P., Gehrels, W.R., ... Rahmstorf, S. (2016). Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1434–E1441. doi: 10.1073/pnas.1517056113.



BIBLIOGRAFIA

- Kossin, J.P. (2018). A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature*, 558, 104–107. doi: 10.1038/s41586-018-0158-3.
- Kossin, J., Emanuel, K., Vecchi, G. (2014). The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature*, 509, 349–352. doi: 10.1038/nature13278.
- Kundzewicz, Z.W., Hov, Ø., Okruszko, T. (red.). (2017). *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*. Poznań. Pobrane z <http://serwer1557491.home.pl/autoinstalator/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/Zmiany-klimatu-i-ich-wp%C5%82yw-na-wybrane-sektory-w-Polsce.pdf>. (dostęp: 06.02.2020).
- Łupikasza, E., Małarzewski, Ł. (2021). Precipitation Change. W: Falarz M. (red.). *Climate Change in Poland* (s. 349–373). Cham: Springer Climate. doi: 10.1007/978-3-030-70328-8_13.
- 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, eaat3272-1–eaat3272-9. doi: 10.1126/sciadv.aat3272.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., ... 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., ... van Vuuren D. (2011). The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their Extension from 1765 to 2300. *Climatic Change (Special Issue)*, 109, 213–240. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (red.). (2000). *Emission Scenarios*. Cambridge: 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).
- NASA (2021). *Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. Land Ice*. Pobrane z <https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/> (dostęp 20.12.2021).
- 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, 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).
- Ostrowski, J., Czarnecka, H., Głowacka, B., Krupa-Marchlewska, J., Zaniewska, M., Sasim, M., Moskwinski, 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* (s. 123–149). 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, 12256-1–12256-12. doi: 10.1038/s41598-017-12520-2.
- Pińskwar, I., Choryński, A. (2021) Projections of Precipitation Changes in Poland. W: Falarz M. (red.), *Climate Change in Poland*. (s. 529–545). Cham: Springer Climate. doi:10.1007/978-3-030-70328-8_22.
- Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). *Nauka o klimacie*. Warszawa: Wydawnictwo Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.
- Popovich, N., Pearce, A., (2017, 28 lipca). It's not your imagination – summers are getting hotter, *New York Times*. Pobrane z <https://www.nytimes.com/interactive/2021/climate/extreme-summer-heat.html> (dostęp: 25.03.2020).
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., ... 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).
- Riahi, L., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2017) The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–169. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., ... Schellnhuber, H.J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. doi: 10.1073/pnas.1810141115.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L.V., Allen, S.K., Bindoff, N.L., ... Xie, S.-P. (2013a). Technical Summary. W: IPCC [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, 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. 33–115). Cambridge, New York: 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.). (2013b). *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, New York: Cambridge University Press.
- Szwed, M. (2019). Variability of Precipitation in Poland under Climate Change, *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 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. *Geographia Polonica*, 80(2), 191–197.
- Trenberth, K.E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123–138. doi: 10.3354/cr00953.
- 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.
- 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), 89–107. doi: 10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x.
- Wibig, J. (2021). Change of Wind. W: Falarz, M. (red.), *Climate Change in Poland* (s. 391–421). Cham: Springer Climate. doi:10.1007/978-3-030-70328-8_15.
- World Glacier Monitoring Service (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).

World Meteorological Organization (2021). *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2020*. Pobrane z https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880#.YH18C08zZBw (dostęp: 14.12.2021).

ROZDZIAŁ 9

Bailey, R., Copeland, O. (1961). Low flow discharges and plant cover relations on two mountain watersheds in Utah. *International Association of Sciences Hydrology Publication*, 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. doi: 10.1126/science.1101476.

Beschta, R.L., Ripple, W.J. (2016). Riparian vegetation recovery in Yellowstone: The first two decades after wolf reintroduction. *Biological Conservation* 148, 93–103. doi: 10.1016/j.biocon.2016.03.031

Estes, J.A., Tinker, M.T., Williams, T.M., Doak, D.F. (1998). Killer Whale Predation on Sea Otters Linking Oceanic and Near-shore Ecosystems. *Science*, 282, 473–476. doi: 10.1126/science.282.5388.473.

Kundzewicz, Z.W., Hov, Ø., Okruszko, T. (red.). (2017), *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*. Poznań: ISRL PAN. Pobrane z https://www.researchgate.net/publication/329587981_Zmiany_klimatu_i_ich_wplyw_na_wybrane_sektory_w_Polsce_Re-daktorzy (dostęp: 07.04.2020).

Mills, J.G., Brookes, J.D., Gellie, N.J. C., Liddicoat, C., Lowe, A.J., Sydnor, H.R., ... Breed, M.F. (2019). Relating Urban Biodiversity to Human Health With the 'Holobiont' Concept. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1–8. doi: 10.3389/fmicb.2019.00550.

Chadwick, D. (2010). Wolf wars, *National Geographic* 217(3), 34–55.

Pecl, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., ... Williams, S.E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355, eaai9214. doi: 10.1126/science.aai9214.

Perino, A., Pereira, H.M., Navarro, L.M., ... Svenning, J.-C., Wheeler, H.C. (2019). Rewilding Complex Ecosystems. *Science*, 364, 5570–5573. doi: 10.1126/science.aav5570.

Ripple, W.J., Beschta, R.L. (2012). Trophic cascades in Yellowstone: The first 15 years after wolf reintroduction. *Biological Conservation* 145, 205–213. doi: 10.1016/j.biocon.2011.11.005

Rosenberg, K.V., Dokter, A.M., Blancher, P.J., ... Marra, P.P. (2019). Decline of the North American avifauna. *Science*, 366, 120–124. doi: 10.1126/science.aaw1313.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., ... Weisser, W.W. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574, 671–674. doi: 10.1038/s41586-019-1684-3.

Springer, A.M., Estes, J.A., Van Vliet, G.B., Williams, T.M., Doak, D.F., Danner, E.M., Forney, K.A., Pfister, B. (2003). Sequential megafaunal collapse in the North Pacific Ocean: An ongoing legacy of industrial whaling? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 12223–12228. doi:10.1073/pnas.1635156100

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. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5(2), 159–182. doi: 10.1007/s12520-013-0122-y.

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(8), 409–415. doi: 10.2307/41811831.

ROZDZIAŁ 10

Bailey, R., Copeland, O. (1961). Low flow discharges and plant cover relations on two mountain watersheds in Utah. *International Association of Sciences Hydrology Publication*, 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, 76–79. doi: 10.1126/science.aax0848.

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. doi: 10.1126/science.1101476.

Beerling, D.J., Leake, J.R., Long, S.P., Scholes, J.D., Ton, J., Nelson, P.N., ... Hansen, J. (2018). Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants*, 4, 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 Near-shore Ecosystems. *Science*, 282, 473–476. doi: 10.1126/science.282.5388.473.

Friedlingstein, P., Jones, M., O'Sullivan, M., Andrew, R., Hauck, J., Peters, G., ... Zeachle S. (2019). Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019, 2019.

IPCC (2019). Summary for Policymakers. W: IPCC [Shukla, P.R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, ... J. Malley (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* (s. 1–34). Pobrane z https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/12/02_Summary-for-Policy-makers_SPM.pdf (dostęp: 10.05. 2020).

Joosten, H., Couwenberg, J. (2008). Peatlands and Carbon. W: Parish, F., A.Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, L. Stringer (red.), *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change* (s. 99–117). Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International Wageningen.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. III (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books: New York.

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. III (1973). *Granice wzrostu*. Przekład W. Rączkowska, S. Rączkowski. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne: Warszawa.

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. *Frontiers in Microbiology*, 10, 550, doi: 10.3389/fmicb.2019.00550.

Nichols, J.E., Peteet, D.M. (2019). Rapid expansion of northern peatlands and doubled estimate of carbon storage. *Nature Geoscience*, 12(11), 917–921.



BIBLIOGRAFIA

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, 72–75. doi: 10.1038/nature18273.

Our World in Data. (2020). Ritchie, H. *The carbon footprint of foods: are differences explained by the impacts of methane?* Pobrane z <https://ourworldindata.org/carbon-footprint-food-methane> (dostęp: 19.05.2020).

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, 61–65. doi: 10.1038/nature01131.

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., Stringer, L. (red.) (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.

Pech, G.T., Araújo, M.B., Bell, J.D., ... Williams, S.E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355, 1–9. doi: 10.1126/science.aai9214.

Perino, A., Pereira, H.M., Navarro, L.M., ... Svenning, J.-C., Wheeler, H.C. (2019). Rewilding complex ecosystems. *Science*, 364, eaav5570. doi: 10.1126/science.aav5570.

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*, 14(2), 32. Pobrane z <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> (dostęp: 10.05.2020).

Rosenberg, K.V., Dokter, A.M., Blancher, P.J., ... Marra, P.P. (2019). Decline of the North American avifauna. *Science*, 366, 120–124. doi: 10.1126/science.aaw1313.

Schneider, T., Kaul, C.M., Pressel, K.G. (2019). Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nature Geoscience*, 12(3), 163–167. doi: 10.1038/s41561-019-0310-1.

Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., ... Weisser, W.W. (2019). Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature*, 574, 671–674. doi: 10.1038/s41586-019-1684-3.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., ... Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 736. doi: 10.1126/science.1259855

Szpak, P., Trevor, J.O., Salomon, A.K., Gröcke, D.R. (2013). Regional ecological variability and impact of the maritime fur trade on near-shore ecosystems in southern Haida Gwaii (British Columbia, Canada): evidence from stable isotope analysis of rockfish (*Sebastes* spp.) bone collagen. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 5(2), 159–182. doi: 10.1007/s12520-013-0122-y.

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(8), 409–415. doi: 10.2307/41811831.

ROZDZIAŁ 11

Australian Psychological Society. (2019). *Coping with Climate Change Distress, Information Sheet*. Pobrane z <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), 95–98. doi: 10.1080/10398560701701288.

Alston, P. (2019). *Climate change and poverty: report of the Special Rapporteur on Extreme Poverty and Human Rights*. Pobrane z <https://digitallibrary.un.org/record/3810720> (dostęp: 15.12.2019).

Burke, M., Hsiang, S.M., Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527, 235–239. doi: 10.1038/nature15725

Butler, J. (2004). *Precarious Life: The Powers of Mourning and Violence*. New York: Verso.

Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, E6089–E6096. doi:1073/pnas.1704949114.

Clayton, S., Manning, C.M., Hodge, C. (2014). *Beyond Storms and Droughts: The Psychological Impacts of Climate Change*. Washington, DC: American Psychological Association and ecoAmerica.

Clayton, S., Manning, C., Krygsman, K., Speiser, M. (2017). *Mental health and our changing climate: impacts, implications, and guidance*. Washington, DC: American Psychological Association and ecoAmerica.

Cunsolo, A., Ellis, N.R. (2018). Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nature Climate Change*, 8(4), 275–281. doi: 10.1038/s41558-018-0092-2.

Dell, M., Jones, B.F., Olken, B.A. (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3): 66–95. doi: 10.1257/mac.4.3.66.

Diffenbaugh, N.S., Burke, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(20), 9808–9813. doi: 10.1073/pnas.1816020116.

Doherty, T.J., Clayton, S. (2011). The Psychological Impacts of Global Climate Change. *American Psychologist*, 66(4), 265–276. doi: 10.1037/a0023141.

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), 290–302. doi: 10.1037/a0023566.

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-conceptualising 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*. New York: Oxford University Press.
- IPCC [Shukla, P.R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C Roberts, ... J. Malley (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* (w druku). www.ipcc.ch/srccl.
- 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.
- Kolstad C., Urama, K., Broome, J., Bruvoll A., Cariño-Olvera, M., Fullerton, D., ... Mundaca L. (2014). Social, Economic and Ethical Concepts and Methods. W: IPCC [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ... J.C. Minx (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* (s. 210–282). Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Laczo, F., Aghazarm, C. (red.). (2009). *Migration, environment and climate change: assessing the evidence*. International Organization for Migration. Pobrane z <https://searchworks.stanford.edu/view/9933011> (dostęp: 15.12.2019).
- Lewis, J. (2018) In the room with climate anxiety, part 1. *Psychiatric Times*, 35(11), 1–2. Pobrane z <https://www.psychiatrictimes.com/climate-change/room-climate-anxiety> (dostęp: 10.05.2020).
- Mendelsohn, R. (2008). The Impact of climate change on agriculture in developing countries, *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1:1, 5–19, DOI: 10.1080/19390450802495882.
- Nazrul Islam, S., Winkel, J. (2017). *Climate Change and Social Inequality* (No. 152). United Nations, Department of Economics and Social Affairs. Pobrane z <https://ideas.repec.org/p/une/wpaper/152.html> (dostęp: 15.12.2019).
- 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*, 70, 8–12. doi: 10.1093/biosci/biz088.
- 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*, 14(2), 32. Pobrane z <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/> (dostęp: 10.05.2020).
- Roszak, T. (1992). *Voice of the Earth: An Exploration of Ecopsychology*. New York: Touchstone.
- Scott, B.A., Amel, E.L., Koger, S.M., Manning, C.M. (2015). *Psychology for sustainability*. London, New York: Routledge.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration. *Anthropocene Review*, 2, 81–98. doi: 10.1177/2053019614564785.
- Sutton, P.C., Anderson, S.J., Costanza, R. Kubiszewski, I. (2016). The ecological economics of land degradation: impacts on ecosystem service values. *Ecological Economics*, 129, 182–192. doi: 10.1016/j.ecolecon.2016.06016.
- Taylor, S.E. (2011). Social support: A Review. W: Friedman, M.S. (red.), *The Oxford Handbook of Health Psychology* (s. 189–214). New York, NY: Oxford University Press.
- Uscinski, J.E., Douglas, K., Lewandowsky, S. (2017). Climate change conspiracy theories. W: *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Pobrane z <https://oxfordre.com/climatescience/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001.0001/acrefore-9780190228620-e-328>. (dostęp: 10.05.2020).
- 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. doi: 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. doi: 10.1371/journal.pone.0074708.
- Wilson, E.O. (2017). Biophilia and the Conservation Ethic. W: Mysterud I. (red.), *Evolutionary Perspectives on Environmental Problems* (s. 263–272). London/New York: Routledge.
- World Health Organization. (2018). *COP24 special report: health and climate change*. Pobrane z <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/276405/9789241514972-eng.pdf> (dostęp: 15.04.2020).
- Xu, C., Kohler, T.A., Lenton, T.M., Svenning, J.-C., Scheffer, M. (2020). Future of the human climate niche. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(21), 11350–11355. doi: 10.1073/pnas.1910114117

ROZDZIAŁ 12

- Anderson, G., Bell, M.L. (2020). 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.
- Andrew, R.M. (2017). It's getting harder and harder to limit ourselves to 2°C. Pobrane z https://folk.universitetetioslo.no/roberan/t/global_mitigation_curves.shtml (dostęp: 18.05.2020).
- BP. (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. Londyn. Pobrane z <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.htm> (dostęp: 15.04.2020).
- BP. (2021). *BP Statistical Review of World Energy 2021*. Pobrane z <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (dostęp 25.09.2022).
- Bundesnetzagentur. (2020). Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur – Stand: 01.04.2020. Pobrane z https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2020_1.html (dostęp 5.02.2020).
- Europejska Agencja Środowiska (2019). *Air quality in Europe – 2019 report*. Pobrane z <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019> (dostęp 15.04.2020).
- Europejska Agencja Środowiska. (2020). *Overview of electricity production and use in Europe*. Pobrane z <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4> (dostęp: 5.01.2020).
- 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.
- Global CCS Institute. (2019). *Global Status of CCS. Targeting Climate Change*. Melbourne. Pobrane z https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/12/GCC_GLOBAL_STATUS_REPORT_2019.pdf (dostęp 15.04.2020).



BIBLIOGRAFIA

- Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. *Polski indeks jakości powietrza*. Pobrane z <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/current> (dostęp: 15.04.2020).
- IPCC (2018). Summary for Policymakers. W: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O., Pörtner, D. Roberts, J., Skea, P.R. Shukla, ... T. Waterfield (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* (s. 1–24). Pobrane z <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 06.02.2020).
- 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, 691–701. doi: 10.1038/s41893-019-0323-1.
- Juda-Rezler, K., Toczko, B. (red.). (2016). *Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce*. Warszawa: Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Pobrane z <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/publications/card/2054> (dostęp: 15.04.2020).
- Klimstra, J., Hotakainen, M. (2011). *Smart Power Generation*. Helsinki: Avain Publishers.
- Komisja Europejska. (2008). *Dokument roboczy służb Komisji – Dokument uzupełniający Wniosek dyrektywa Parlamentu europejskiego i Rady w sprawie podzielnego składowania dwutlenku węgla – Streszczenie oceny skutków {KOM(2008) 18 wersja ostateczna} {SEK(2008) 54} /* SEC/2008/0055 końco*. Pobrane z http://publications.europa.eu/resource/ellar/9c9f0806-1665-4601-bc4a-47e4f0eb46a3.0007.01/DOC_1 (dostęp: 15.04.2020).
- Marchese, A.J., Zimmerle, D. (2018). *The U.S. natural gas industry is leaking way more methane than previously thought*. Pobrane z <https://theconversation.com/the-us-natural-gas-industry-is-leaking-way-more-methane-than-previously-thought-heres-why-that-matters-98918> (dostęp: 15.04.2020).
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., ... 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*. Pobrane z <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (dostęp: 02.06.2020).
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2019). *IEA Energy Atlas, Paryż*. Pobrane z <http://energyatlas.iea.org/> (dostęp: 15.04.2020).
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2019). *World Energy Balances*. Pobrane z <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics> (dostęp: 5.01.2020).
- Międzynarodowa Agencja Energetyczna. (2020). *Data and Statistics*. Pobrane z www.iea.org/data-and-statistics (dostęp: 5.01.2020).
- Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej. (2020). *Power Reactor Information System*. Pobrane z <https://pris.iaea.org/> (dostęp: 2.05.2020).
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J.D., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. W: IPCC [Stocker, T.F., 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. 659–703). Cambridge: Cambridge University Press. Pobrane z <http://www.climatechange2013.org/report/full-report> (dostęp: 12.01.2020).
- Ponchet, M. (2007). *Milestones for Nuclear Power Infrastructure Development*. CEA. Pobrane z <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/PDFplus/2007/tm33552/day3Ponchet.pdf> (dostęp: 15.04.2020).
- Prados de la Escosura, Leandro, (2021). Augmented human development in the age of globalisation. *The Economic History Review* 74(4), 946–975. doi: 10.1111/ehr.13064.
- PSE S.A. (2020). *Praca KSE – Zapotrzebowanie mocy KSE*. Pobrane z <https://www.pse.pl/obszary-dzialalnosci/krajowy-system-elektroenergetyczny/zapotrzebowanie-kse> (dostęp: 5.02.2020).
- Raupach, M., Davis, S., Peters, G., Andrew, R.M., Candell, J.G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jotzo, F., van Vuuren, D., Le Quéré, C. (2014). Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*, 4, 873–879. doi: 10.1038/nclimate2384.
- 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. doi: 10.1289/ehp.1104789.
- Stacje systemu monitoringu jakości powietrza w Polsce. Pobrane z <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/maps/measuringstation> (dostęp: 15.04.2020).
- United Nations Environment Programme (2019). *Emissions Gap Report 2019*. Nairobi: UNEP. Pobrane z <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019> (dostęp: 20.01.2020).
- Vallero, D.A. (2008). *Fundamentals of Air Pollution* (Fourth Edition). Academic Press. Pobrane z <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123736154> (dostęp: 5.02.2020).
- Xu, Y., Ramanathan, V., Victor, D.G. (2018). Global warming will happen faster than we think. *Nature*, 564, 30–32. doi: 10.1038/d41586-018-07586-5.

ROZDZIAŁ 13

- Australian Psychological Society (2019). *Coping with climate change-distress*. Pobrane z <https://www.psychology.org.au/for-the-public/Psychology-topics/Climate-change-psychology/Coping-with-climate-change-distress> (dostęp: 15.04.2020).
- American Psychological Association (2020). *Majority of US adults believe climate change is most important issue today*. Pobrane z <https://www.apa.org/news/press/releases/2020/02/climate-change> (dostęp: 15.04.2020).
- Besta, T., Jaśko, K., Grzymała-Moszczyńska, J., Górka, P. (2019). *Walcz, protestuj, zmieniaj świat: psychologia aktywizmu*. Sopot: Wydawnictwo Smak Słowa.
- Bowles, S. (2016). *The Moral Economy: Why Good Incentives Are No Substitute for Good Citizens*. New Haven: Yale University Press.
- Brechin, S.R., Bhandari, M. (2011). Perceptions of Climate Change Worldwide. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 871–885. doi: 10.1002/wcc.146.
- Chenoweth, E., Stephan, M.J. (2011). *Why Civil Resistance Works: The Strategic Logic of Nonviolent Conflict*. New York: Columbia University Press.
- Chenoweth, E., Stephan, M.J. (2014). Drop Your Weapons: When and Why Civil Resistance Works. *Foreign Affairs*, 93, 94–106.
- 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. doi: 10.1073/pnas.1906589116.

- Hansen, J.E. (2015). Environment and Development Challenges. The Imperative of a Carbon Fee and Dividend. W: Semmler, L.B.A. (red.), *The Oxford Handbook of the Macroeconomics of Global Warming*. Oxford: Oxford University Press. doi: 10.1093/oxford-hb/9780199856978.013.0026.
- 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.
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. W: IPCC [Shukla, P.R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, ... J. Malley (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* (s. 1–41). Pobrane z <https://www.ipcc.ch/srcccl/> (dostęp: 19.05.2020).
- 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), 1–21.
- 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.
- Kantar Polska. (2019). *Ziemianie atakują!* Kantar. Pobrane z <https://ziemianieatakuj.pl/>. (dostęp: 19.05.2020).
- Krivaneck, R. (2020). Factors limiting lifetime of nuclear power plants with pressurized-water reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 370, 110872. doi: 10.1016/j.nucengdes.2020.110872.
- NEA. (2020). *Projected Costs of Generating Electricity – 2020 Edition*. Nuclear Energy Agency. https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf (dostęp: 19.05.2020).
- Our World in Data. (2019). Ritchie, H., Roser, M. *Land Use*. Pobrane z <https://ourworldindata.org/land-use> (dostęp: 19.05.2020).
- Pawlaczyk, P. (red.). (2020). *Renaturyzacja wód: Podręcznik dobrych praktyk renaturyzacji wód powierzchniowych*. Kraków: Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie.
- Ripple, W.J., Wolf, C., Newsome, T.M., Barnard, P., Moomaw, W.R. (2019). World Scientists' Warning of Climate Emergency. *Bioscience*, 70(1), 8–12. doi: 10.1093/biosci/biz088.
- Roque, B.M., Brooke, C.G., Ladau, J., Polley, T., Marsh, L.J., Najafi, N., ... Eloë-Fadrosch, E. (2019). Effect of the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* on methane production and rumen microbiome assemblage. *Animal Microbiome*, 1(1), art. 3. doi: 10.1186/s42523-019-0004-4.
- Rothwell, G., Rust, J. (1997). On the Optimal Lifetime of Nuclear Power Plants. *Journal of Business and Economic Statistics: A Publication of the American Statistical Association*, 15(2), 195–208. <https://doi.org/10.1080/07350015.1997.10524700>.
- Searchinger, T.D., Wierseni, S., Beringer, T., Dumas, P. (2018). Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature*, 564, 249–253. doi: 10.1038/s41586-018-0757-z.
- Sheikh, K. (2017, 21 czerwca). Small Steps to Save Energy Exhaust Political Will for Bigger Actions. *Scientific American*. Pobrane z <https://www.scientificamerican.com/article/small-steps-to-save-energy-exhaust-political-will-for-bigger-actions/>. (dostęp: 19.05.2020).
- Society for Ecological Restoration International & Policy Working Group (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Tucson: Society for Ecological Restoration International. Pobrane z <https://www.ser-rrc.org/resource/the-ser-international-primer-on-ecological-restoration/>.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D., ... 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. doi: 10.1111/0022-4537.00175.
- Szwagrzyk, J., Gazda, A., Dobrowolska, D., Chećko, E., Zaremba, J., Tomska, 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. doi: 10.1111/jvs.12672.
- University of Wisconsin-Madison. (2019, 25 marca). Trees are crucial to the future of our cities. *Science Daily*. Pobrane z <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/03/19.05.2020>.
- 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. doi: 10.1038/nclimate3316.
- Wilson, E.O. (2016). *Half-earth: our planet's fight for life*. New York: Liveright Publishing Corporation, a division of W.W. Norton & Company.

PODSUMOWANIE

ZMIANA KLIMATU: 25 PYTAŃ I ODPOWIEDZI

- Gulev, S.K., Thorne, P.W., Ahn, J., Dentener, F.J., Domingues, C.M., Gerland, S., ... Vose, R.S. (2021). Changing State of the Climate System. W: IPCC [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (red.)], *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom i New York, NY, USA (s. 287–422). doi:10.1017/9781009157896.004.
- Popkiewicz, M. (2022). *Zrozumieć transformację energetyczną*. Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.
- Popkiewicz, M., Kardaś, A., Malinowski, S. (2019). *Nauka o klimacie*. Warszawa: Wydawnictwo Nieoczywiste, Katowice: Wydawnictwo Sonia Draga: Post Factum.



ŹRÓDŁA DODATKOWYCH ILUSTRACJI



Znakomita większość materiałów ilustracyjnych pochodzi z domeny publicznej i została opatrzona źródłem i nazwiskiem lub pseudonimem autora na samym zdjęciu lub w podpisie do ilustracji. Materiały nieopisane na stronach książki pochodzą z następujących źródeł:

- s. 121** **Adam Smith** – Wikimedia Commons; James Tassie, domena publiczna
David Ricardo – Wikimedia Commons; domena publiczna
John Stuart Mill – Wikimedia Commons; George Frederic Watts, domena publiczna
Rachel Carson – Wikimedia Commons; U.S. Fish and Wildlife Service, domena publiczna
- s. 122** **Jimmy Carter** – Wikimedia Commons; Department of Defense. Department of the Navy. Naval Photographic Center, domena publiczna
- s. 123** **Kryzys paliwowy** – Wikimedia Commons; Frank J. (Frank John) Aleksandrowicz, domena publiczna
- s. 125** **William Nordhaus** – Wikimedia Commons; Bengt Nyman, CC BY-SA 2.0
- s. 130** **William E. Rees** – Wikimedia Commons; Nick Wiebe, CC BY-SA 3.0



Pexels; Visual Entity

- s. 132** **Papież Franciszek** – Wikimedia Commons; Casa Rosada, CC BY-SA 2.0
- s. 152** **Okładka pierwszej części Szóstego raportu podsumowującego Międzyrządowego Zespołu ds. Zmiany Klimatu (IPCC, 2021);**
https://informacje.pan.pl/images/2021/Raport_IPC-C_2021_11_04_T%C5%81UMACZENIE_FINAL.pdf
- s. 242** **Ulice Nowego Jorku podczas blackoutu w 2003 roku** – Wikimedia Commons; Glitch010101, CC BY-SA 2.0
- s. 243** **Zbiornik elektrowni szczytowo-pompowej na górze Żar widziany z kabiny szybowca, 2008 r.** – Wikimedia; Ongrys, CC BY-SA 3.0
- s. 267** **Artur Pigou** – Wikimedia Commons; domena publiczna
- s. 271** **Elektrownia jądrowa w pobliżu miasta Oi w Japonii** – Flickr; Greg Webb/IAEA Imagebank; CC BY-SA 2.0

Wszystkie pozostałe zdjęcia zamieszczone w tej publikacji pochodzą ze zbiorów Uniwersytetu Warszawskiego albo z archiwów rodzinnych Autorów tekstów lub fotografii i zostały wykorzystane za zgodą właścicieli praw do tych ilustracji.

Z RECENZJI

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 zmiany klimatu. Szeroki zakres tematyczny tej książki pozwala czytelnikowi na zdobycie najważniejszych informacji z kilku dziedzin nauki na temat globalnego ocieplenia oraz na stworzenie sobie całościowego obrazu wyzwań społecznych związanych z tymi procesami. Podręcznik ten jest zarazem napisany w sposób przystępny i zrozumiały zarówno dla studentów kierunków ścisłych, jak i humanistycznych. To szczególnie ważne przy opisie zjawisk fizycznych leżących u podłoża globalnych zmian klimatu.

z recenzji dr. hab. Krzysztofa Niedziałkowskiego

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 *Klimatycznym ABC*, jest zbiorem pustym. Książka może zainteresować również światłe osoby pracujące nad sobą w formie kształcenia ustawicznego, na przykład absolwentów uczelni sprzed wielu lat.

z recenzji prof. dr. hab. Zbigniewa W. Kundzewicza

Klimatyczne ABC to kompendium rzetelnych informacji na temat zmiany klimatu pochodzących z renomowanych źródeł, powstałe z inicjatywy naukowców zatrudnionych na Uniwersytecie Warszawskim. Jego autorzy są pracownikami najważniejszych ośrodków akademickich, ekspertami w swoich dziedzinach nauki. Efektem ich współpracy jest podręcznik łatwy w lekturze i interdyscyplinarny – tak jak sam problem zmiany klimatu. Poruszane w nim zagadnienia powiązane są z takimi dziedzinami jak: fizyka, chemia, biologia (w tym ekologia), geografia, nauki społeczne, psychologia i wiedza o społeczeństwie. Książka jest podzielona na cztery części, które przedstawiają mechanizmy (część 1) i przyczyny (część 2) zmiany klimatu, konsekwencje tego procesu dla życia na naszej planecie (część 3) oraz działania, które możemy podjąć, aby zapobiec najbardziej negatywnym skutkom tych zjawisk (część 4).

Książka jest skierowana do studentów zainteresowanych lepszym zrozumieniem podstaw zmiany klimatu niezależnie od kierunku studiów oraz do nauczycieli i uczniów szkół średnich, a także do wszystkich osób szukających inspiracji do właściwych działań.

- *Z każdym mijającym rokiem będziemy odczuwać coraz poważniejsze konsekwencje zmiany klimatu. Wpłyną one nie tylko na otaczające nas środowisko, ale także na naszą pracę, zdrowie, możliwości spędzania wolnego czasu i sytuację ekonomiczną. Dlatego ważne jest, aby poznać podstawowe fakty i zastanowić się nad tym, co można zrobić, aby ograniczyć niekorzystne zmiany i jak się na nie przygotować.*
- *Lektura **Klimatycznego ABC** pomaga zrozumieć procesy kształtujące klimat Ziemi oraz przyczyny jego obecnej antropogenicznej zmiany. Autorzy poszczególnych rozdziałów przedstawiają jej ekologiczne, społeczne i ekonomiczne konsekwencje oraz pokazują połączenia pomiędzy zmianą klimatu a systemami umożliwiającymi istnienie życia na Ziemi. W ostatniej części tłumaczą, co możemy zrobić – jako jednostki i jako społeczeństwa – aby spowolnić te procesy, i zastanawiają się, czy i jak możemy się przystosować do klimatu przyszłości.*

www.wuw.pl

ISBN 978-83-235-5924-5



9 788323 559245