

# Fizyka Procesów Klimatycznych

## Projekcje. Punkty krytyczne

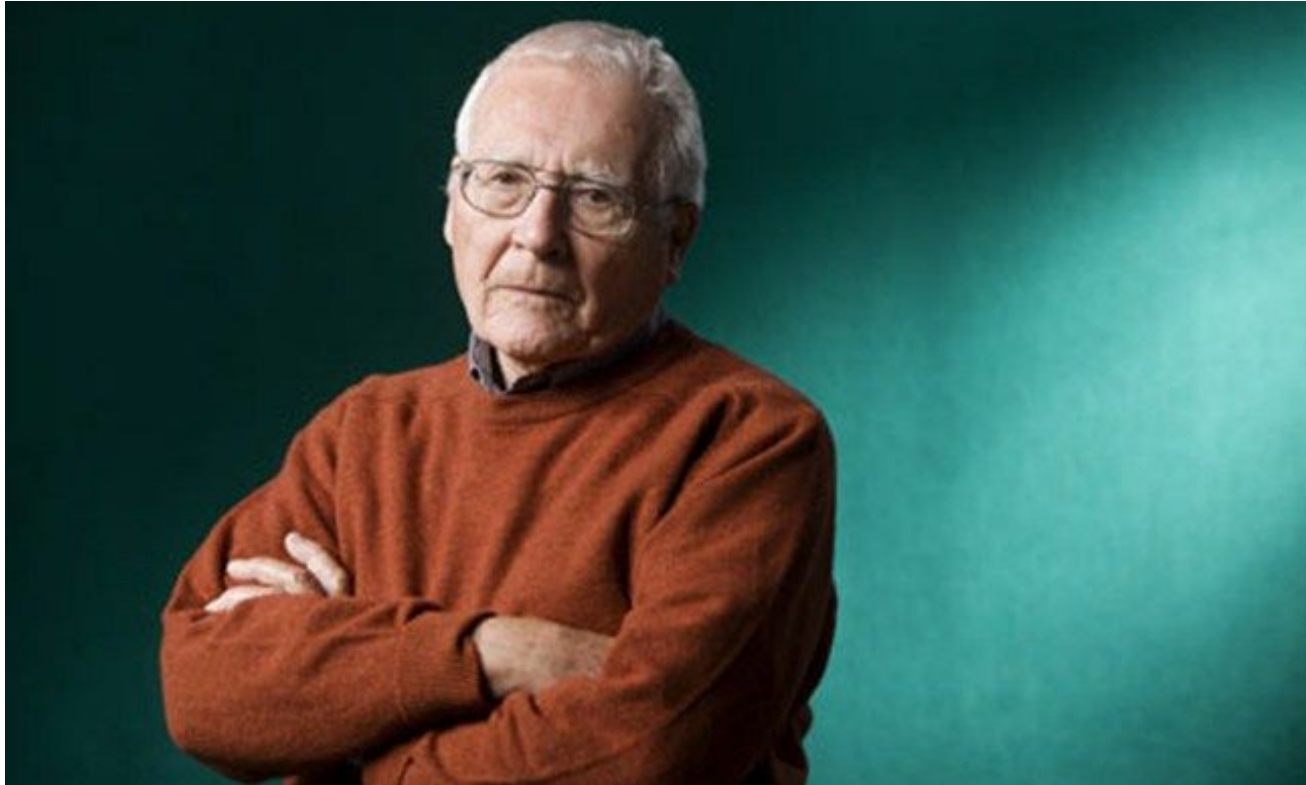
prof. dr hab. Szymon Malinowski  
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
malina@igf.fuw.edu.pl

dr hab. Krzysztof Markowicz  
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski  
kmark@igf.fuw.edu.pl

Wykorzystano slajdy dr Aleksandry Kardaś

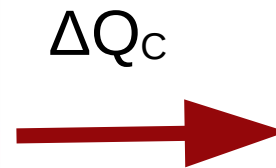
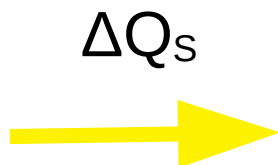
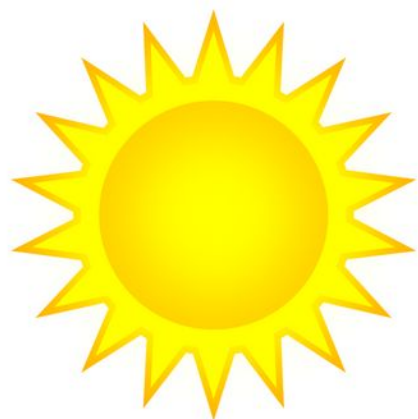
# James Ephraim Lovelock

born Jul. 26, 1919, deceased Jul. 26, 2022



“The planet we live on has merely to shrug to take some fraction of a million people to their deaths,” Lovelock wrote in 2006.

“But this is nothing compared with what may soon happen; we are now so abusing the Earth that it may rise and move back into the hot state it was in 55m years ago, and if it does, most of us, and our descendants, will die.”



T1

>

T2

>

T3

**Temperatura planety rośnie, gdy  $\Delta Q_s > \Delta Q_c$**

**Temperatura planety spada, gdy  $\Delta Q_s < \Delta Q_c$**

Rośnie  
wymuszanie  
radiacyjne przez  
gazy cieplarniane.

BAMS, State of  
Climate 2023

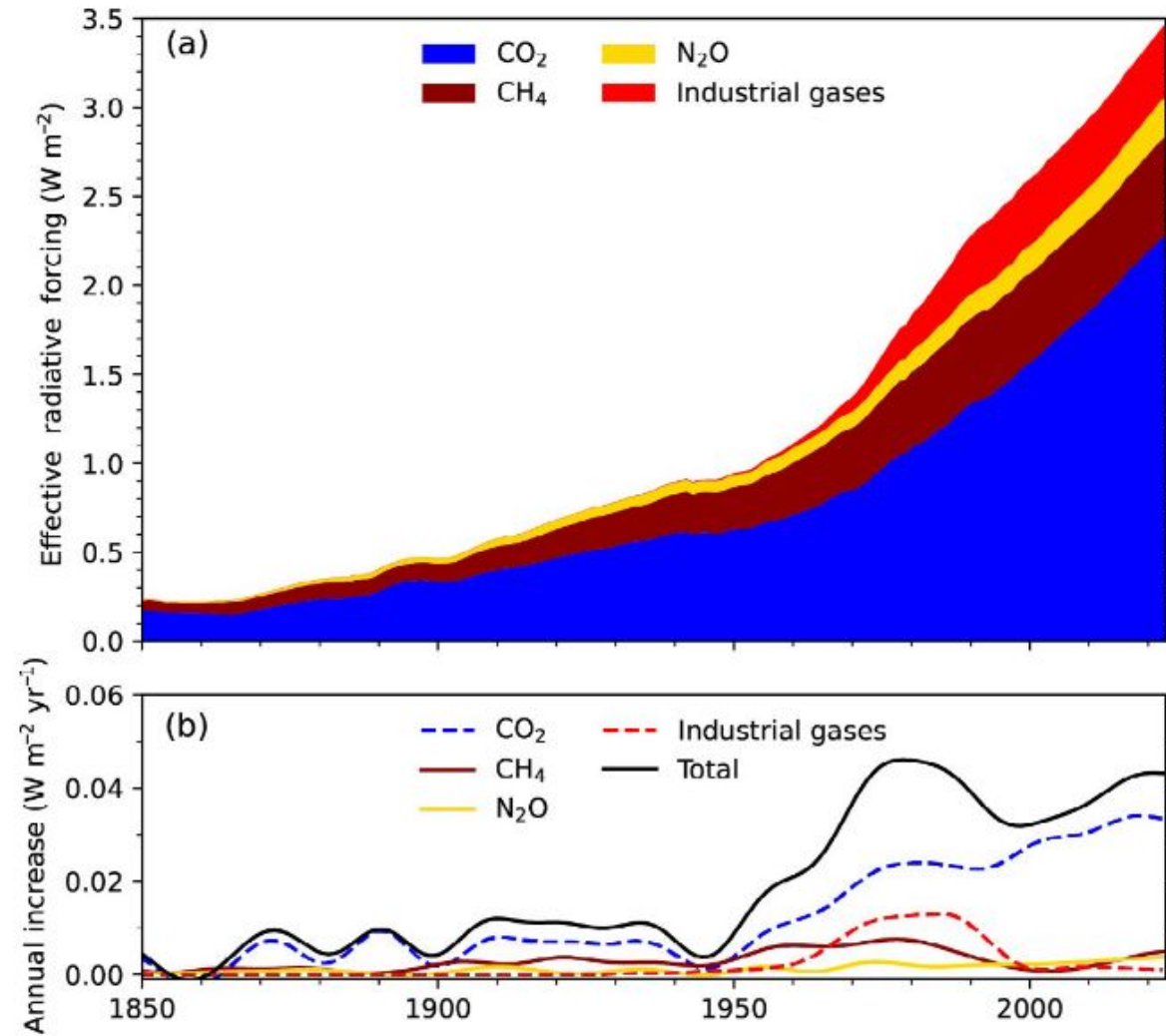
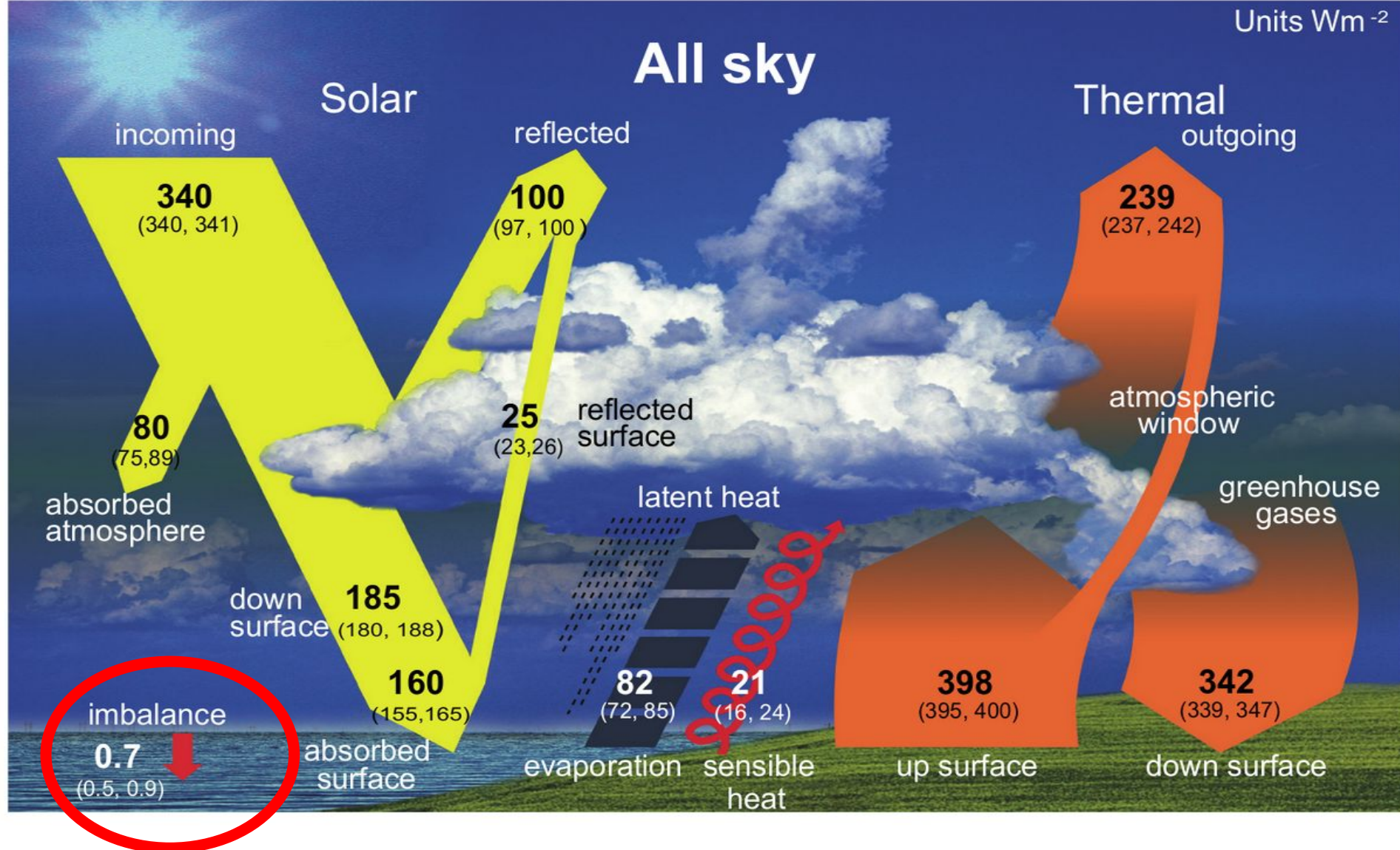


Fig. 2.60. (a) Effective radiative forcing (W m<sup>-2</sup>) due to long-lived greenhouse gases (LLGHGs; see Table 2.10 for details on industrial gases). (b) Annual increase in direct radiative forcing (W m<sup>-2</sup>).

## All sky



Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w  $W/m^2$ .  
W nawiasach zakres niepewności.

# Nierównowaga energetyczna narasta

<https://doi.org/10.5194/esd-2026-287>

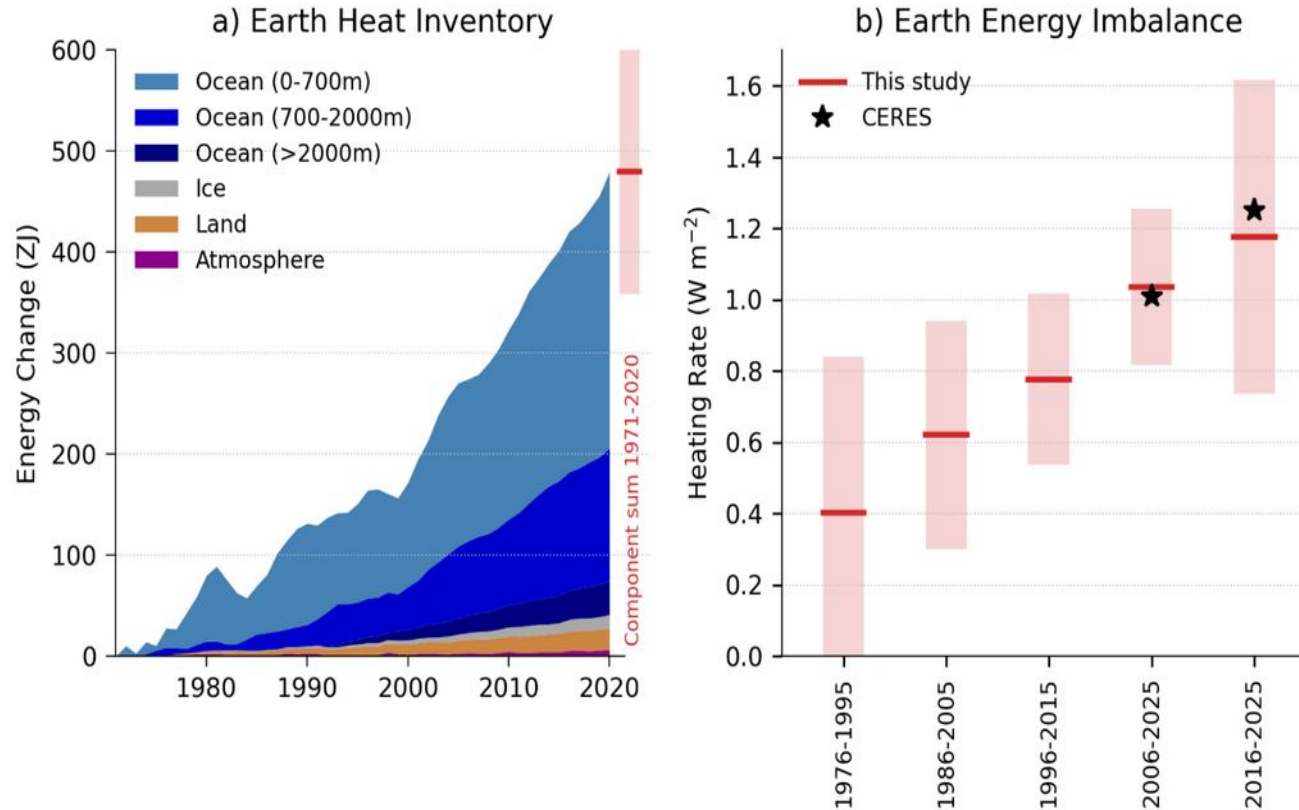
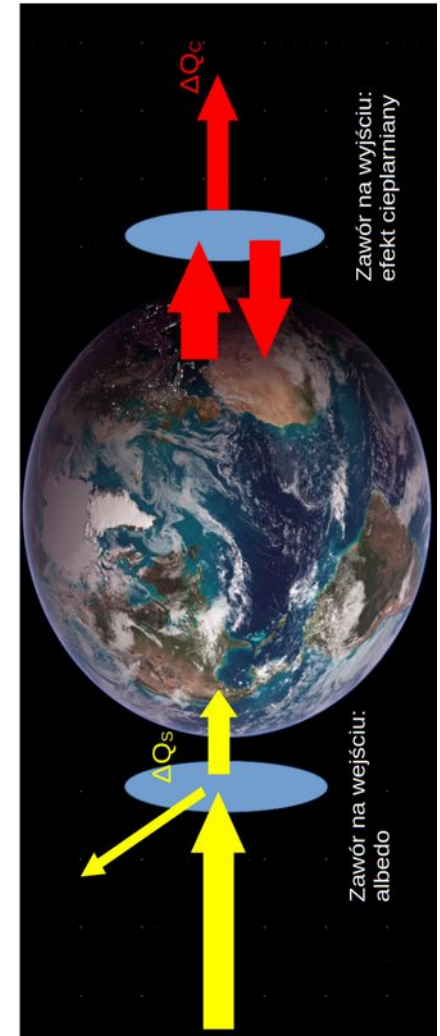
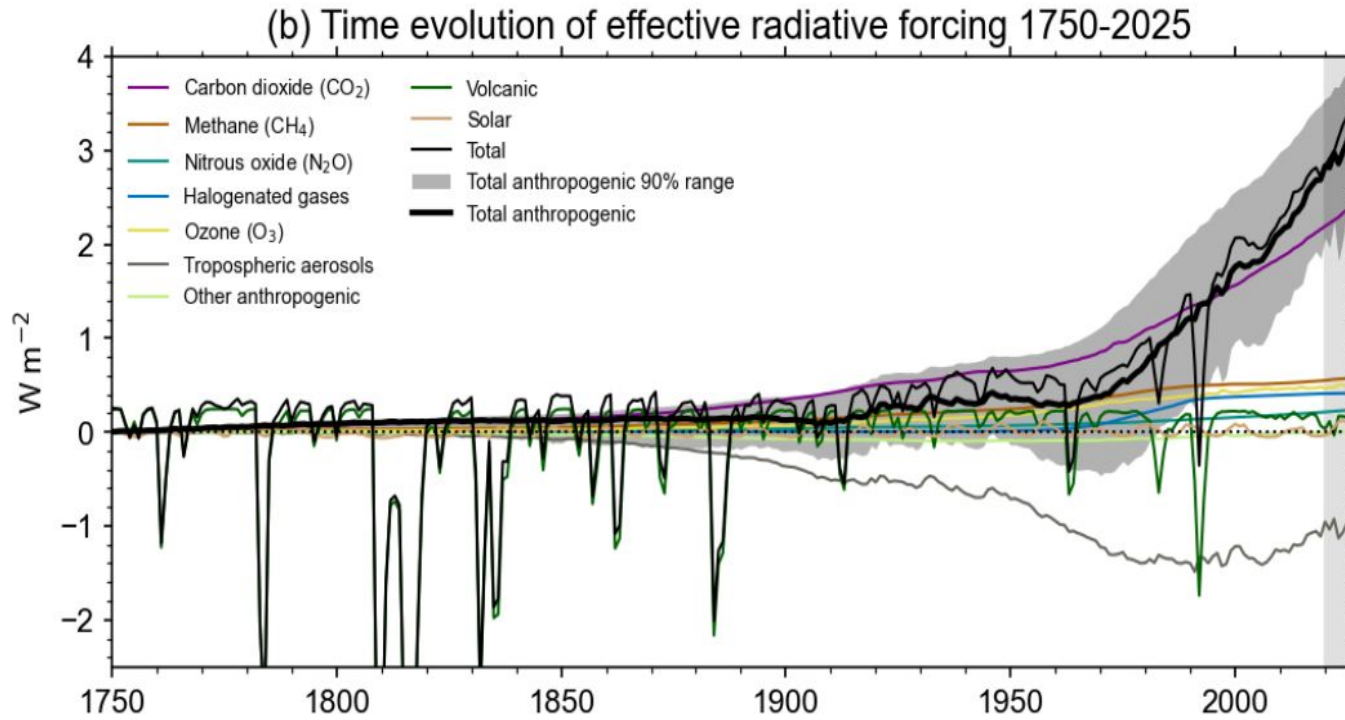
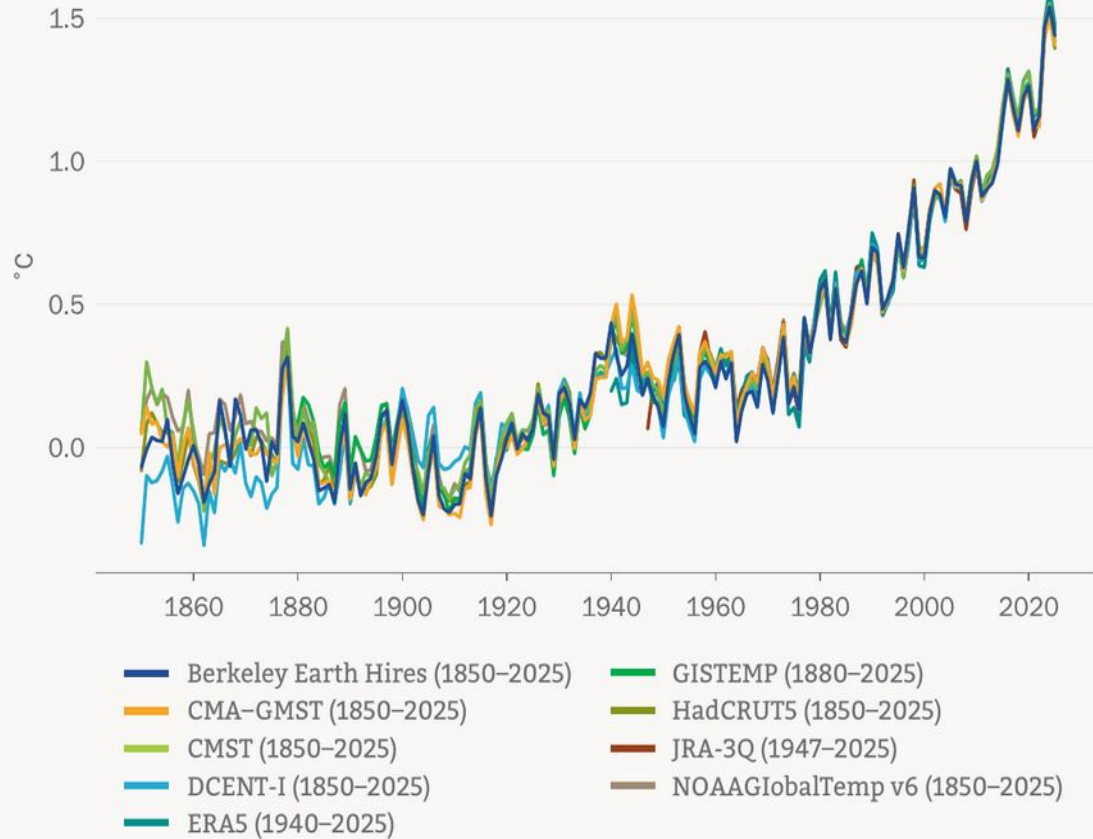


Figure 7 (a) Observed changes in the Earth heat inventory for the period 1971–2020, with component contributions as indicated in the figure legend. (b) Estimates of the Earth energy imbalance for successive overlapping 20-year periods and the most recent decade. Shaded regions indicate the *very likely* range (90 % to 100 % probability). The CERES EBAF-TOA Ed4.2.1 estimates for the two most recent periods are shown for comparison (Loeb et al, 2024). Data use and approach are based on the AR6 methods and further described in Supplement Sect. S6. .



... i gromadzenie energii w systemie klimatycznym - powoduje zmiany w temperaturze powietrza przy powierzchni lądów i oceanów, parowaniu i cyrkulacjach atmosferycznych i oceanicznych.



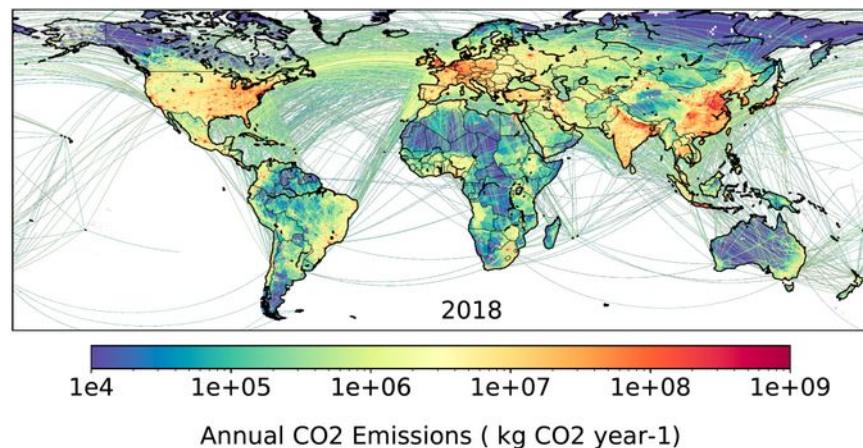
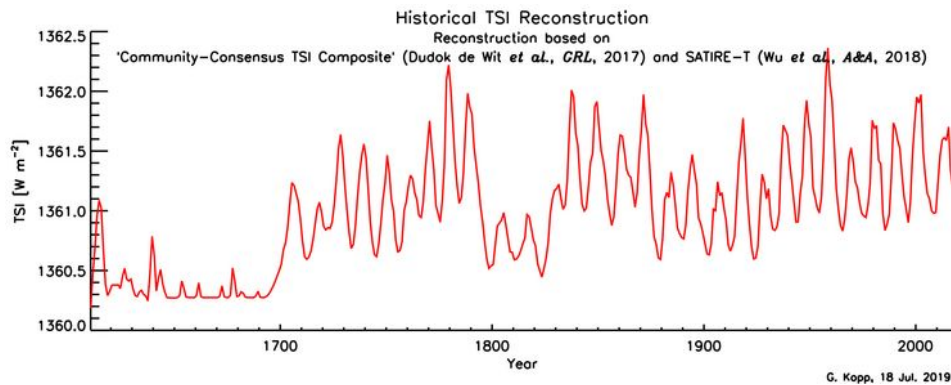
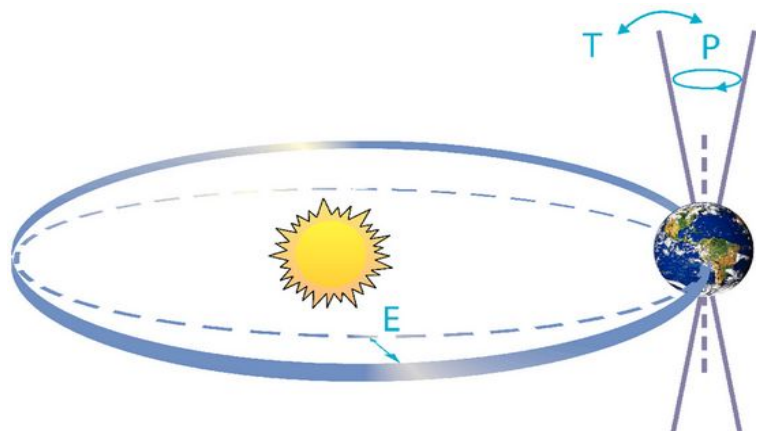
**Figure 2.** Annual global mean temperature anomalies relative to a pre-industrial (1850–1900) baseline shown from 1850 to 2025

Source: Data are from the datasets indicated in the legend. For details see Datasets and methods.

Zmiany temperatury  
powierzchni Ziemi od 1850

# Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym

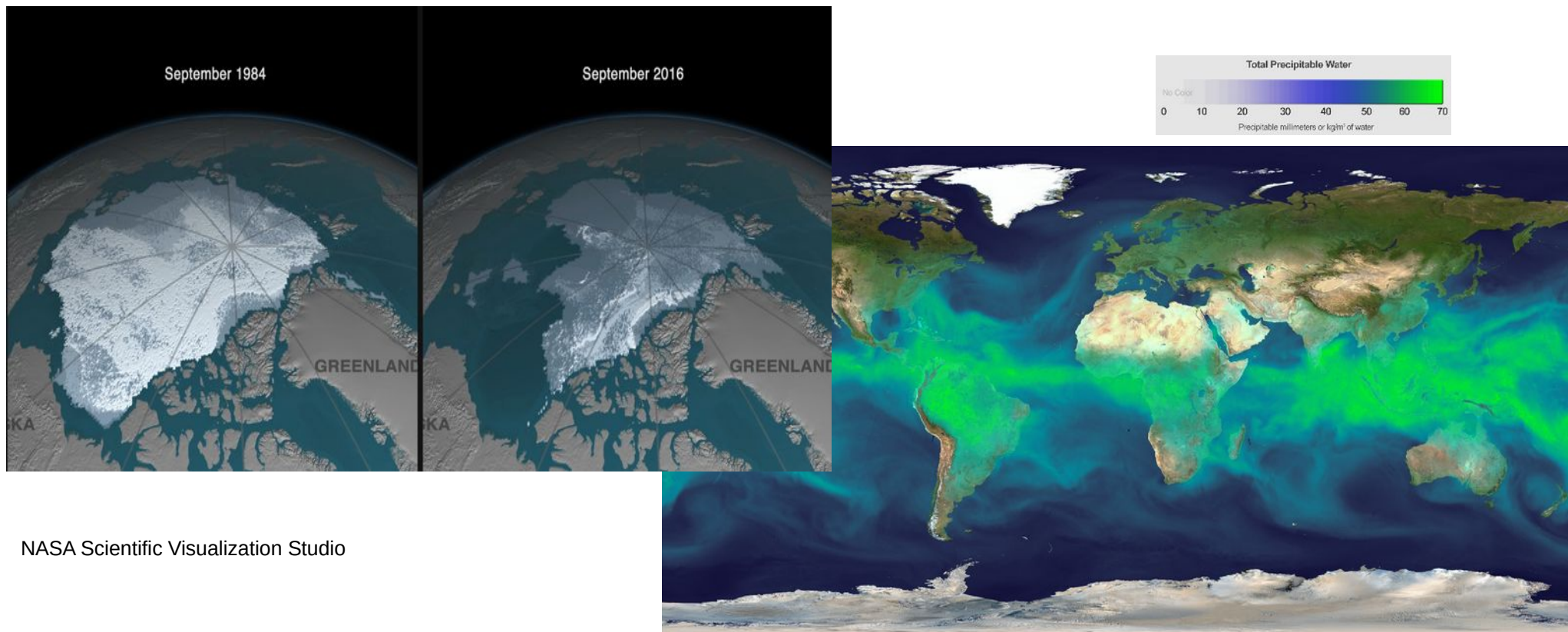
**Wymuszenia** inicjują zmiany klimatu.



Przykłady: aktywność słoneczna, zmiany orbitalne, antropogeniczne i wulkaniczne emisje gazów czy aerozoli.

# Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym

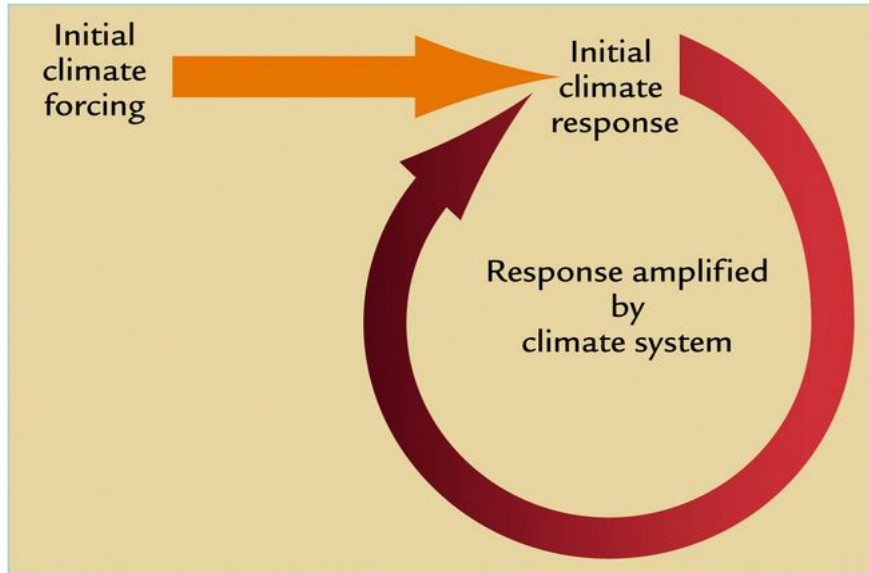
**Sprzężenia** to procesy zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego, które **skutkują dalszymi zmianami klimatu.**



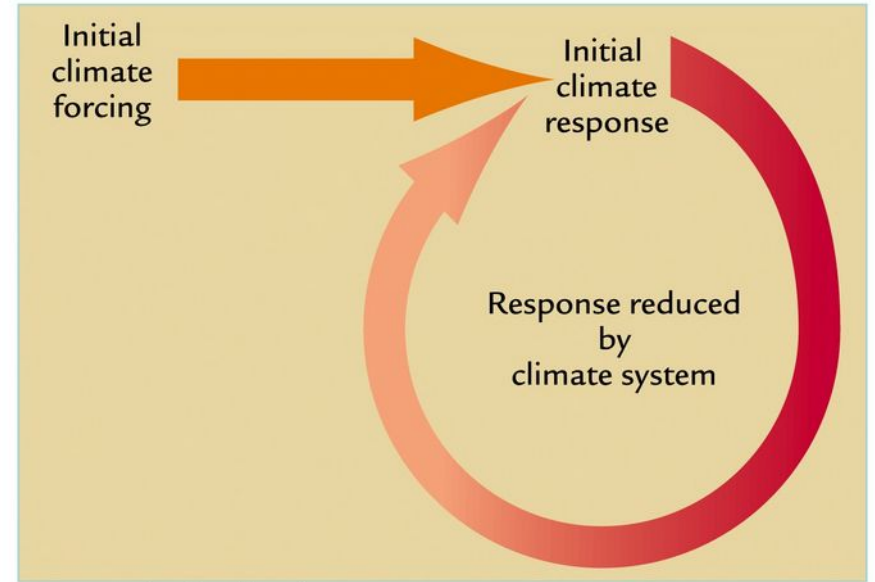
NASA Scientific Visualization Studio

Przykłady: zmiany albedo wskutek zmian zlodzenia czy zmiany zawartości pary wodnej w powietrzu wskutek zmian temperatury.

# Sprzężenia mogą być dodatnie lub ujemne.



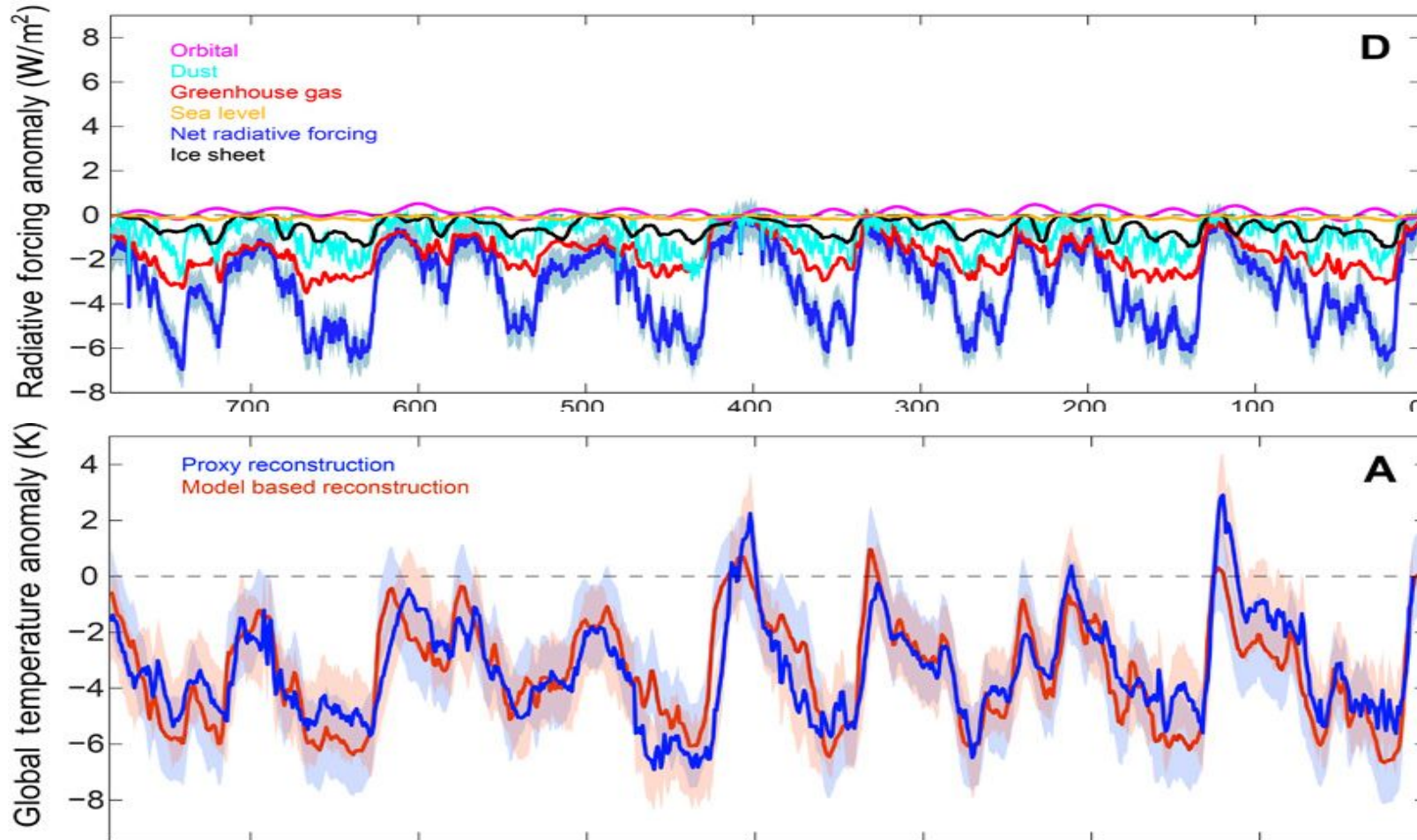
A Positive feedback



B Negative feedback

# Mechanizm epok lodowych:

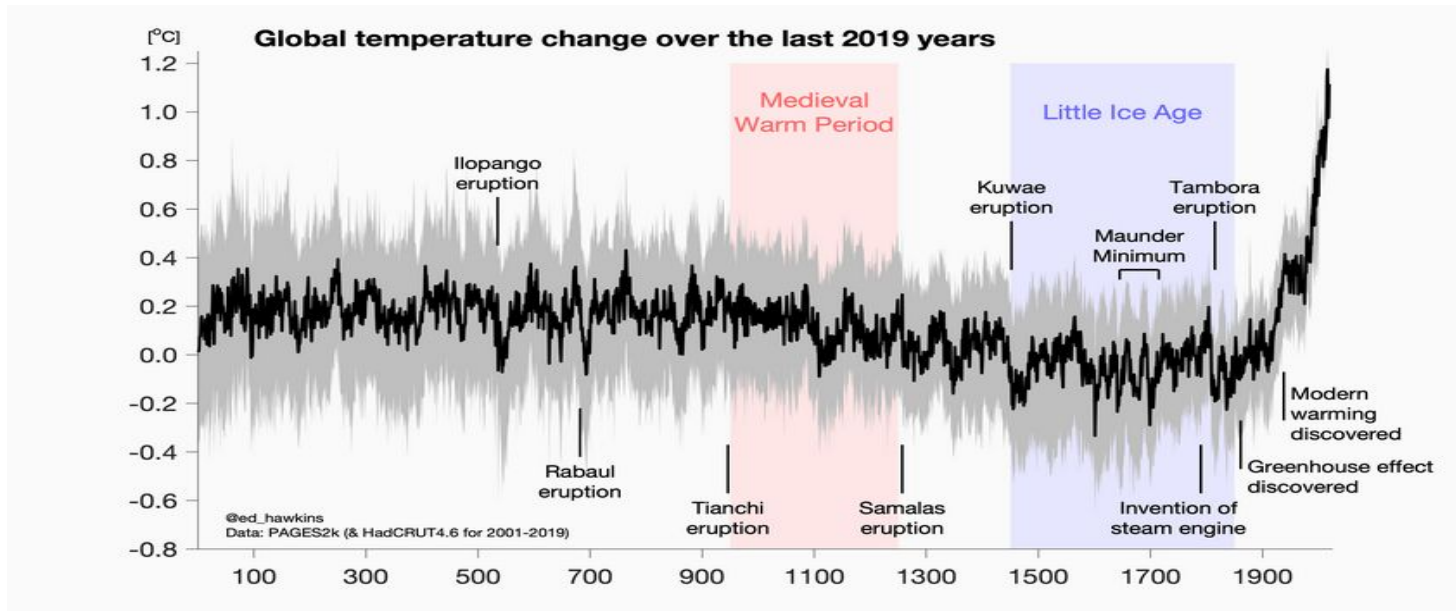
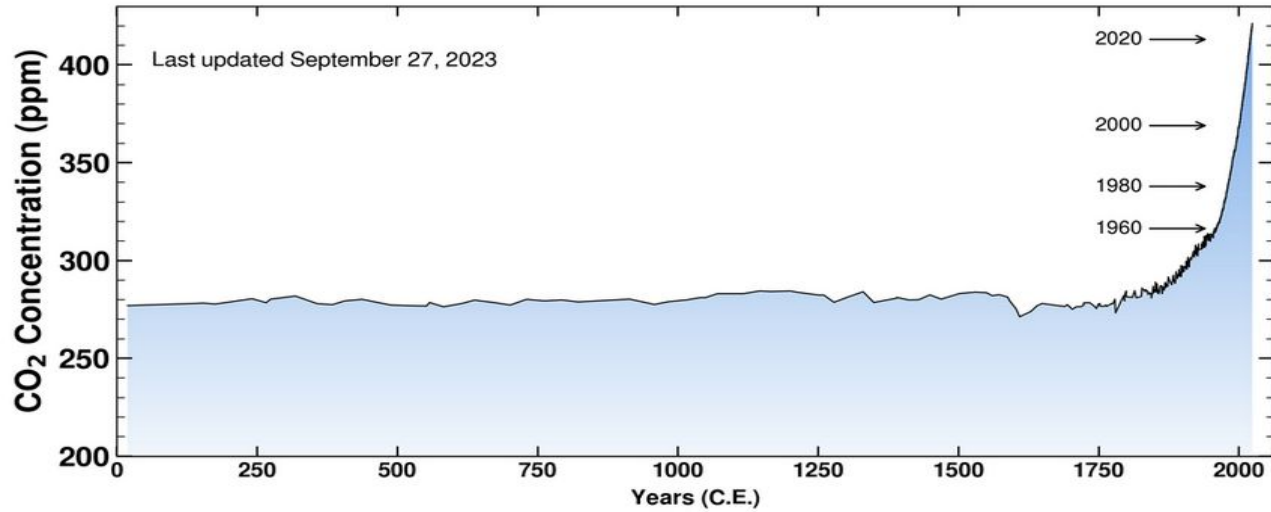
**Wymuszenia orbitalne (D)** i **sprzężenia (D)** skutkują **zmianami w bilansie radiacyjnym (D)** i dalej odpowiednią **zmiennością temperatury (A)**.



Friedrich et al.,  
Science Advances  
09 Nov 2016:  
Vol. 2, no. 11,  
e1501923  
DOI:  
10.1126/sciadv.1501  
923

# Zmiany koncentracji CO<sub>2</sub>: kiedyś sprzężenie, dziś wymuszenie.





Odchylenie średniej globalnej temperatury  
powierzchni Ziemi od średniej z lat 1850-1900

°C  
2.0  
1.5  
1.0  
0.5  
0.0  
-0.5

1850

1900

1950

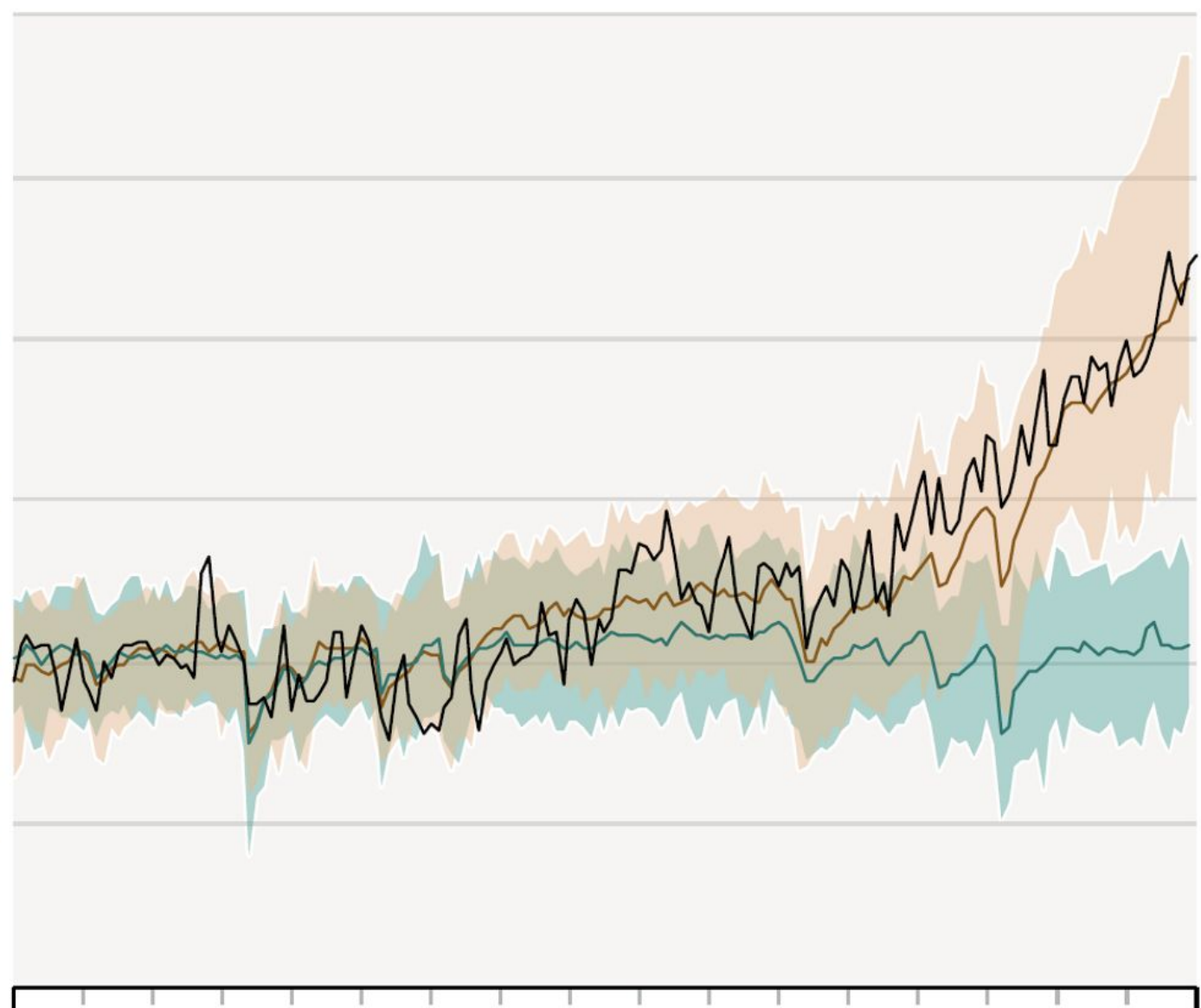
2000

2020

obserwacje  
symulacje:  
antropogeniczne  
i naturalne

symulacje:  
wyłącznie naturalne  
(Słońce i wulkany)

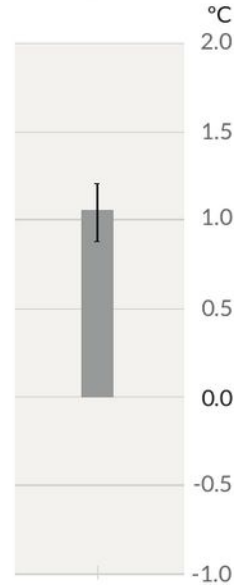
IPCC 6AR



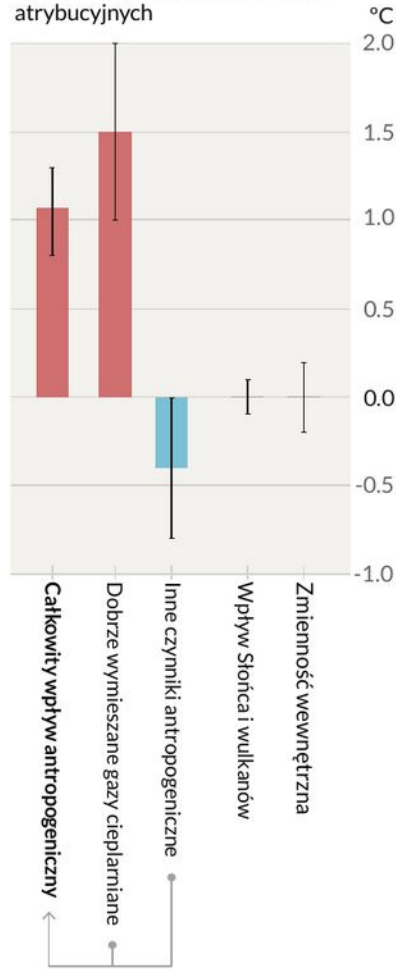
# Obserwowane ocieplenie jest spowodowane emisjami będącymi skutkiem działalności człowieka, ocieplenie związane z gazami cieplarnianymi jest częściowo maskowane przez chłodzący wpływ aerozoli

**Obserwowane ocieplenie**      **Wkłady w ocieplenie oszacowane na podstawie dwóch uzupełniających się metod**

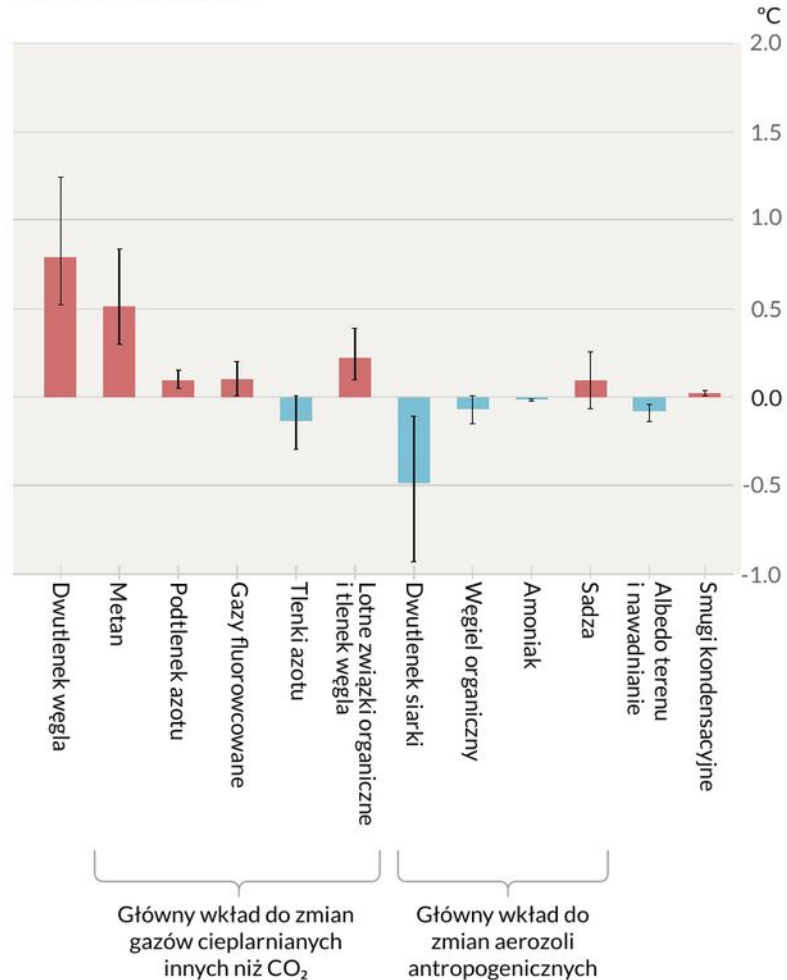
a) Ocieplenie obserwowane w okresie 2010–2019 względem okresu 1850–1900



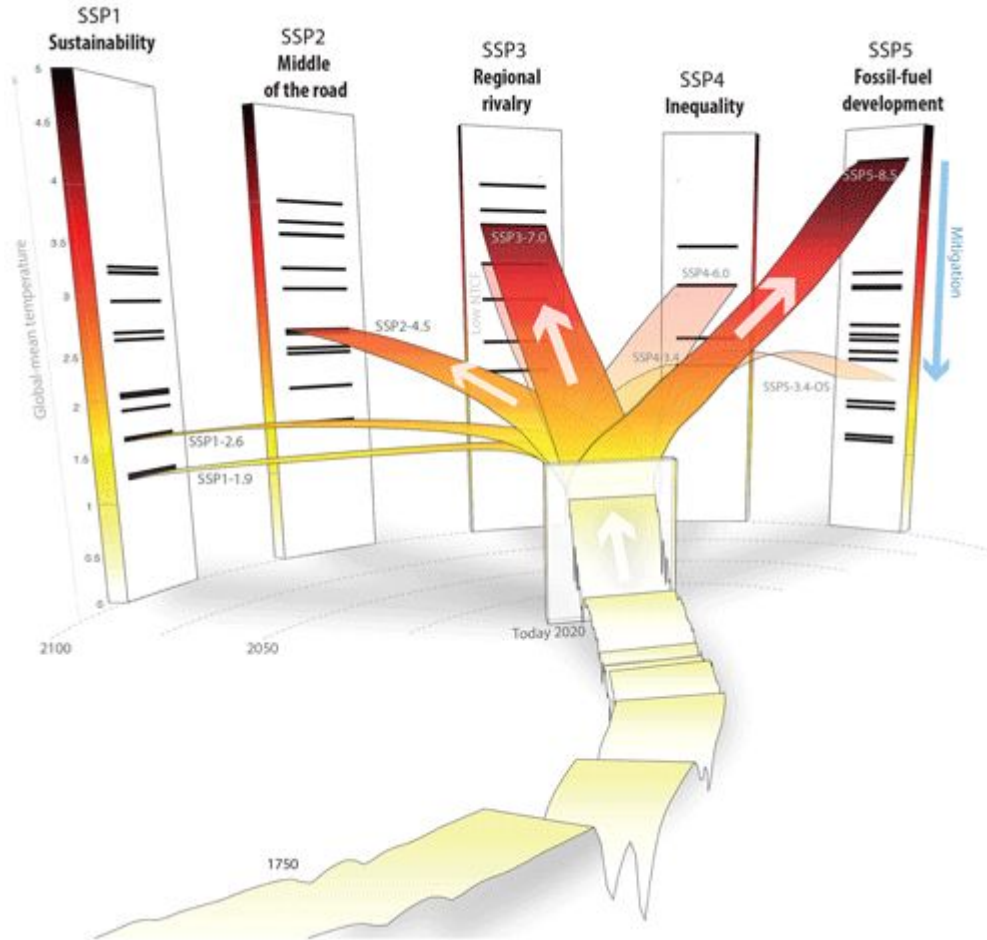
b) Wkład w ocieplenie w okresie 2010–2019 względem okresu 1850–1900, oszacowany na podstawie badań atrybucyjnych



c) Wkład w ocieplenie w okresie 2010–2019 względem okresu 1850–1900, oszacowany na podstawie badań wymuszeń radiacyjnych



# Scenariusze do projekcji klimatu

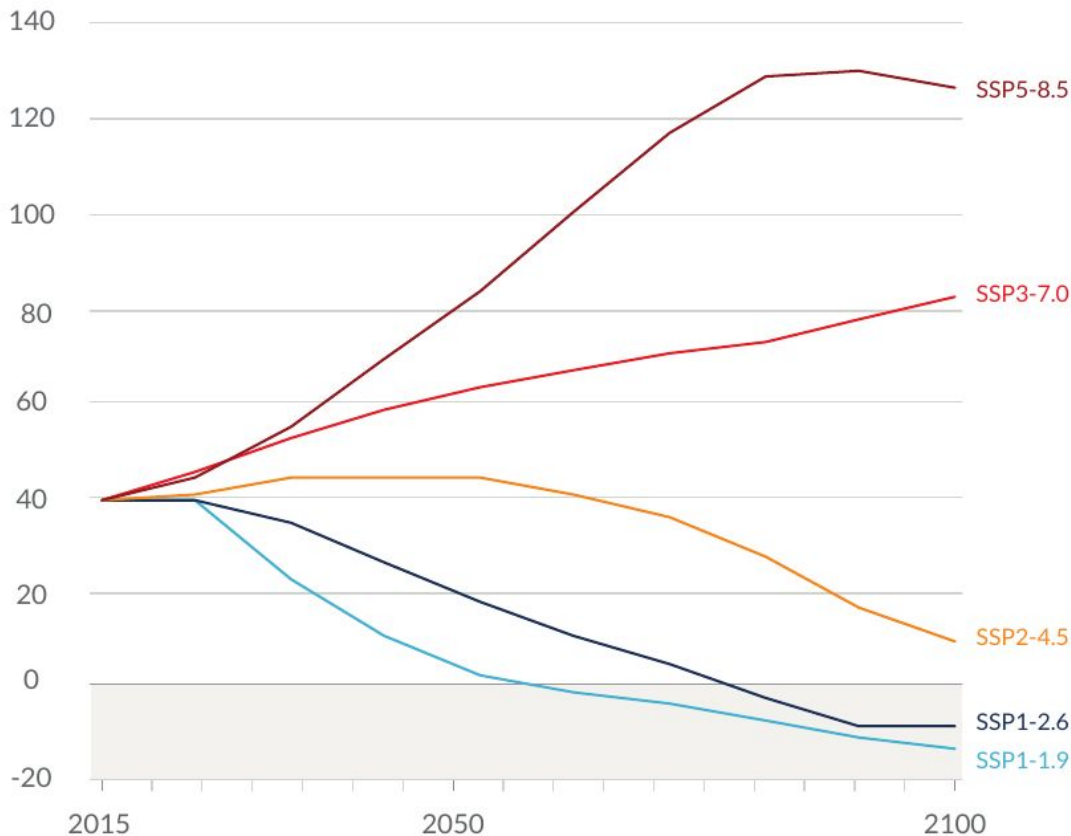


Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., and Wang, R. H. J.: The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, 2020.

# Przyszłe emisje spowodują w przyszłości dodatkowe ocieplenie. Całkowite ocieplenie w przyszłości będzie przede wszystkim efektem dotychczasowych i przyszłych emisji CO<sub>2</sub>

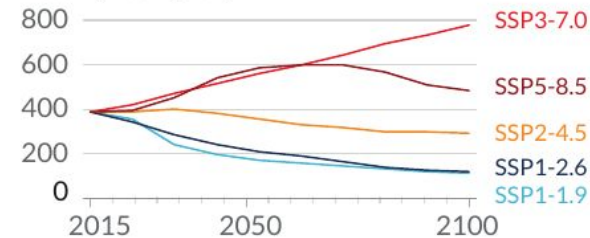
a) Przyszłe roczne emisje CO<sub>2</sub> (po lewej) oraz wybranych istotnych substancji innych niż CO<sub>2</sub> (po prawej) według pięciu przykładowych scenariuszy

Dwutlenek węgla (GtCO<sub>2</sub>/rok)

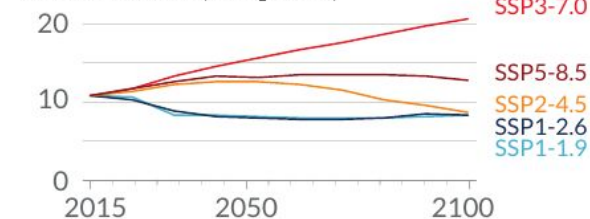


Wybrane gazy cieplarniane inne niż CO<sub>2</sub>

Metan (MtCH<sub>4</sub>/rok)

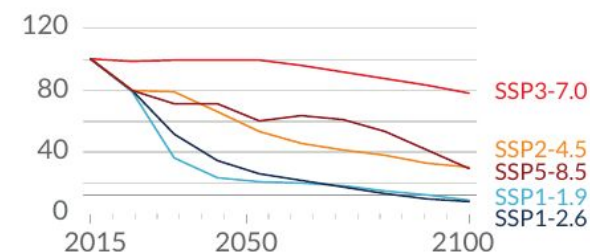


Podtlenek azotu (MtN<sub>2</sub>O/rok)



Wybrana substancja zanieczyszczająca powietrze będąca też prekursorem aerozoli

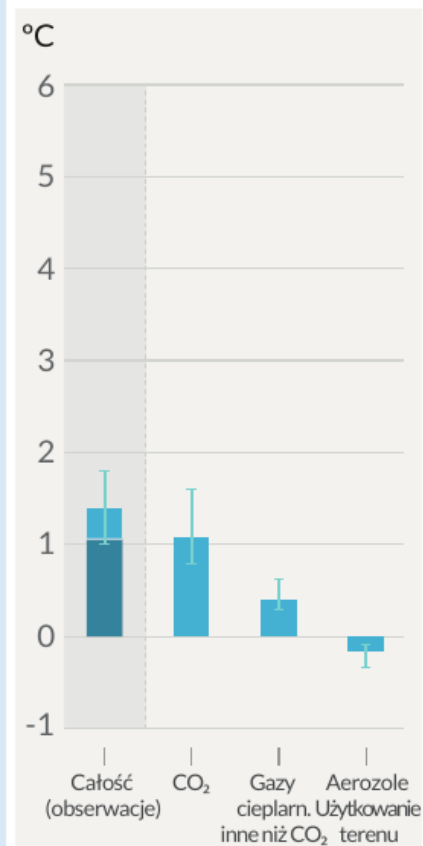
Dwutlenek siarki (MtSO<sub>2</sub>/rok)



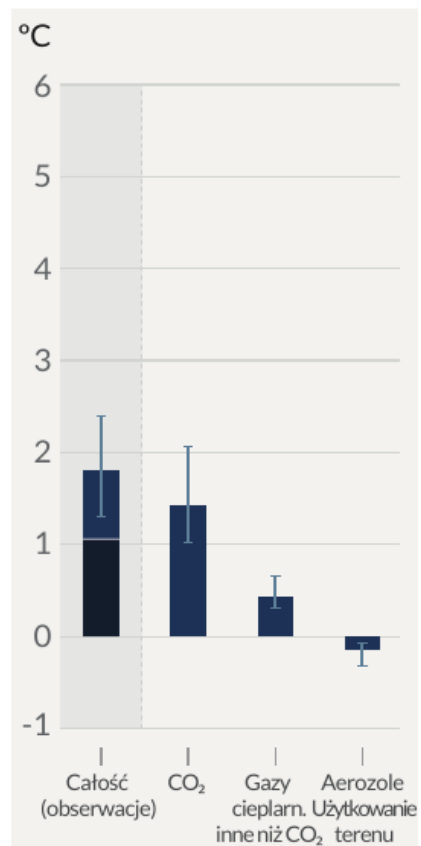
## b) Udział emisji różnych substancji, głównie CO<sub>2</sub> we wzroście temperatury Ziemi

Zmiana globalnej temperatury powierzchni w okresie 2081–2100 w stosunku do okresu 1850–1900 (°C)

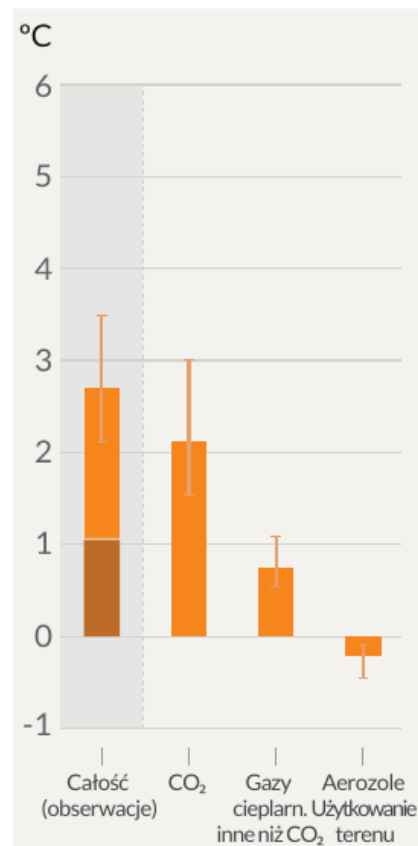
### SSP1-1.9



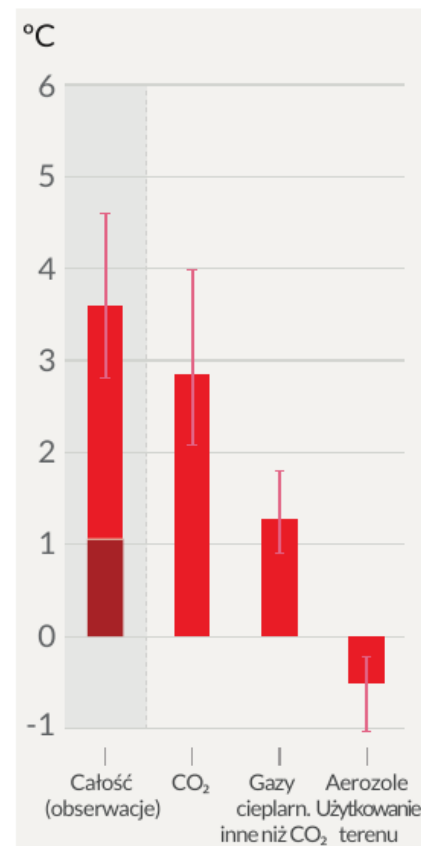
### SSP1-2.6



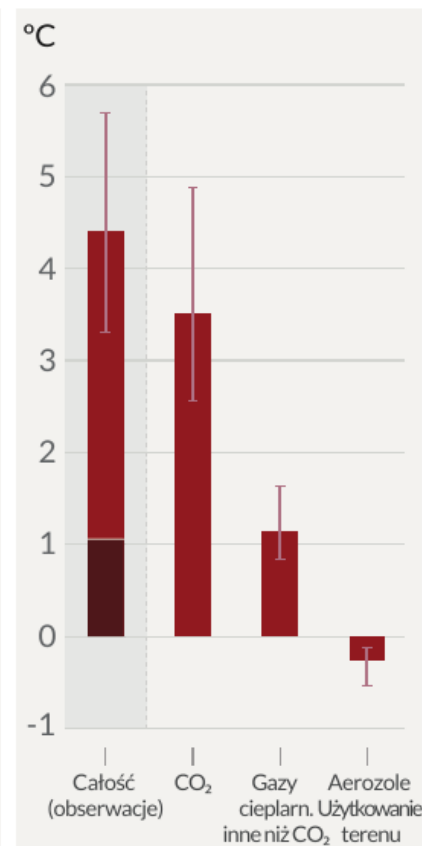
### SSP2-4.5



### SSP3-7.0



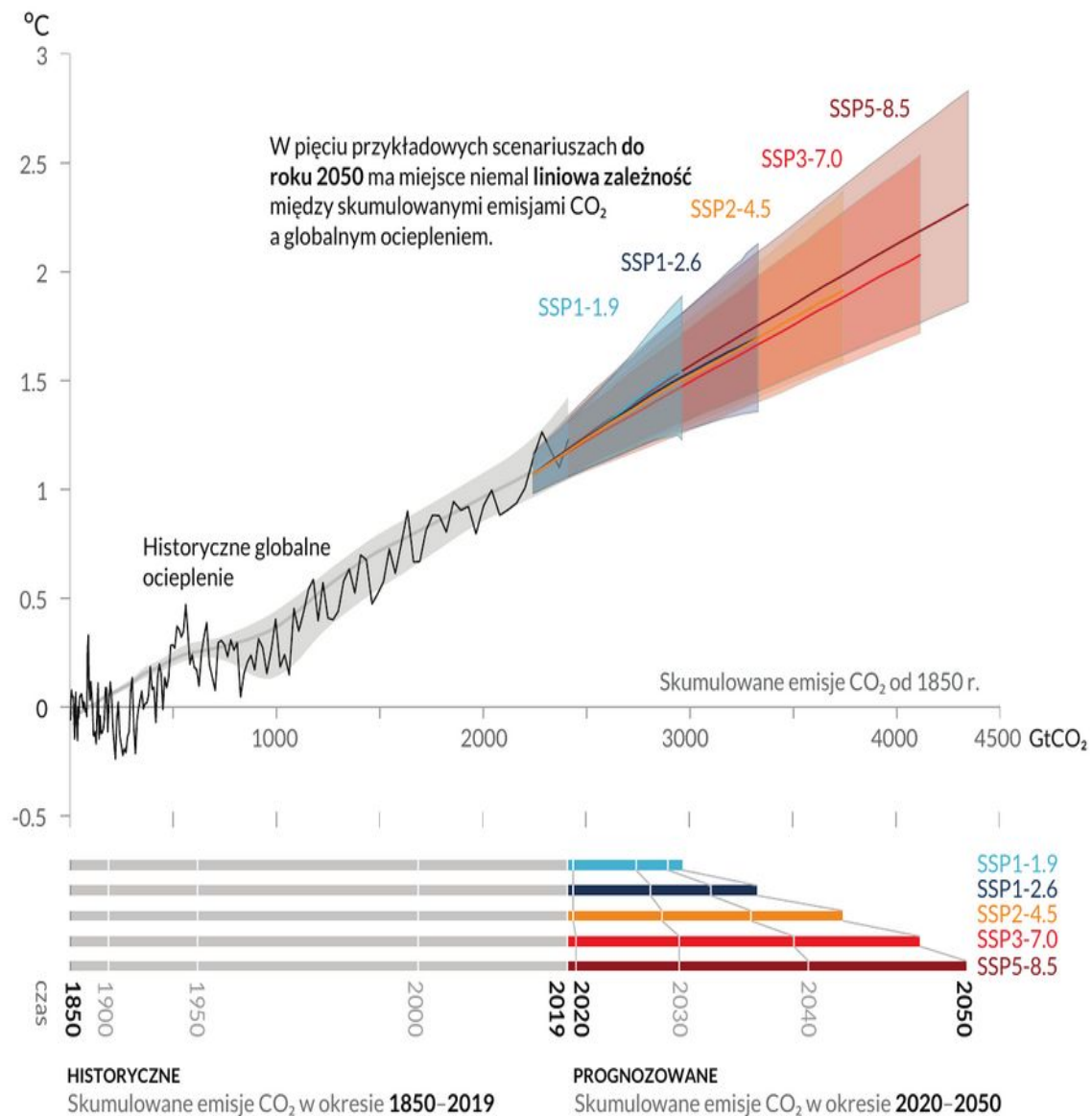
### SSP5-8.5



Całkowite ocieplenie (dotychczasowe ocieplenie w ciemniejszym odcieniu), ocieplenie spowodowane CO<sub>2</sub>, ocieplenie spowodowane gazami cieplarnianymi innymi niż CO<sub>2</sub> oraz chłodzenie spowodowane zmianami aerozoli i użytkowania terenu

# Każda tona emisji CO<sub>2</sub> powiększa globalne ocieplenie

Wzrost globalnej temperatury powierzchni od okresu 1850–1900 r. (°C) w zależności od skumulowanych emisji CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>)

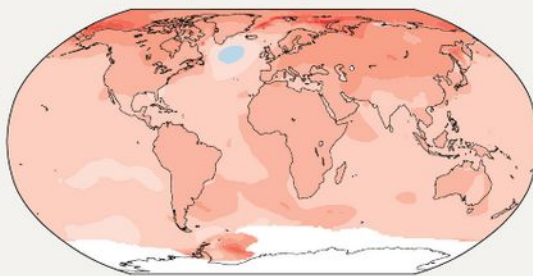


# Z każdym wzrostem globalnego ocieplenia regionalne zmiany średnich temperatur, opadów i wilgotności gleby stają się coraz większe

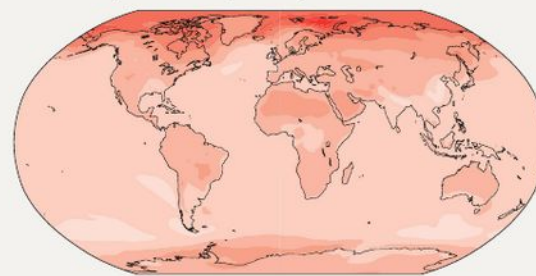
## a) Zmiany średniej rocznej temperatury (°C) przy globalnym ociepleniu o 1°C

Ocieplenie o 1°C dotyka wszystkie kontynenty i jest generalnie większe na lądzie niż nad oceanami, co pokazują zarówno obserwacje jak i symulacje. Dla większości regionów obserwacje zgadzają się z wynikami modelowania.

Zmiany dla globalnego ocieplenia o 1°C na podstawie pomiarów



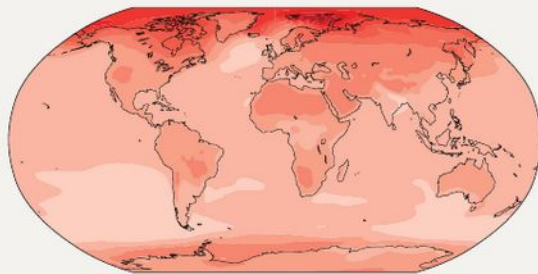
Zmiany dla globalnego ocieplenia o 1°C na podstawie symulacji modelami klimatu



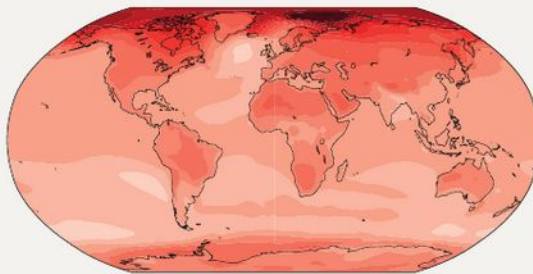
## b) Zmiany średniej rocznej temperatury (°C) w stosunku do okresu 1850–1900

Dla wszystkich poziomów ocieplenia lądy ocieplają się szybciej niż oceany, a Arktyka i Antarktyda ocieplają się szybciej niż tropiki.

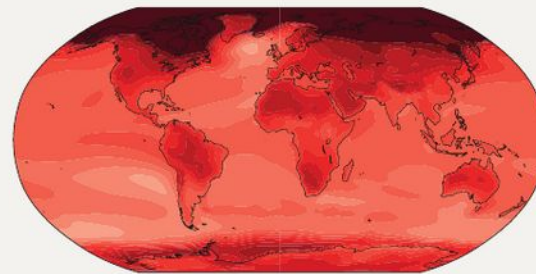
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 1,5°C



Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 2°C



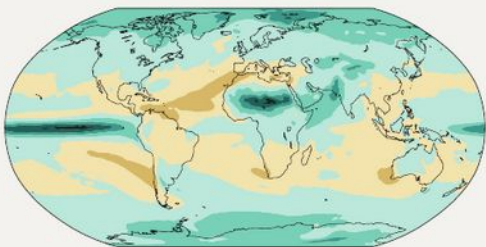
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 4°C



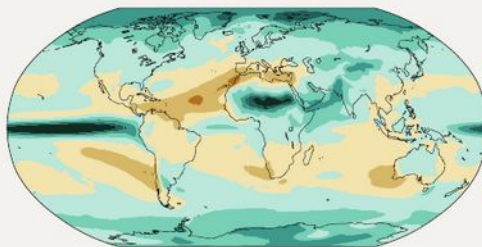
### c) Zmiana średnich opadów rocznych (%) w stosunku do okresu 1850-1900

Prognozuje się wzrost opadów w wysokich szerokościach geograficznych, na równikowym Pacyfiku i w części regionów monsunowych, oraz spadek opadów na części obszarów subtropikalnych i na niewielkiej części obszarów tropików.

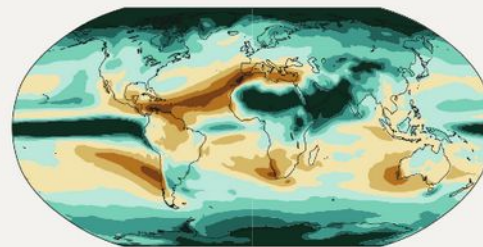
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 1,5°C



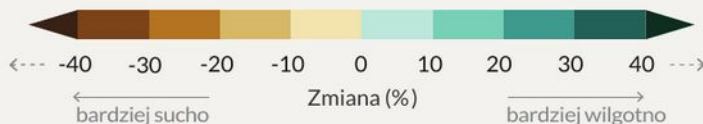
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 2°C



Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 4°C



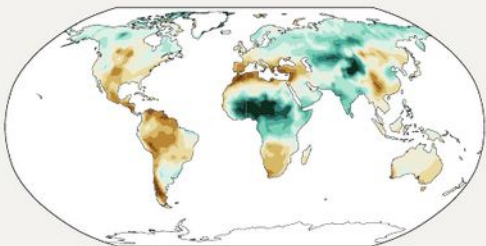
Dla regionów suchych stosunkowo mała zmiana bezwzględna może okazać się dużą zmianą w %.



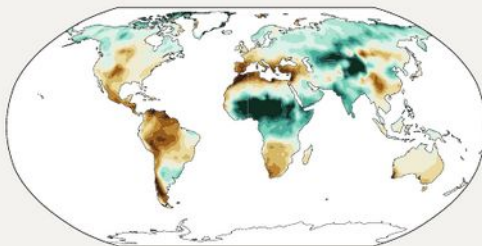
### d) Zmiana średniej rocznej wilgotności w całym profilu glebowym (odchylenia standardowe)

Dla wszystkich progów ocieplenia, zmiany wilgotności gleby odzwierciedlają w dużej mierze zmiany w opadach, jednak widoczne są również pewne różnice wynikające z wpływu ewapotranspiracji.

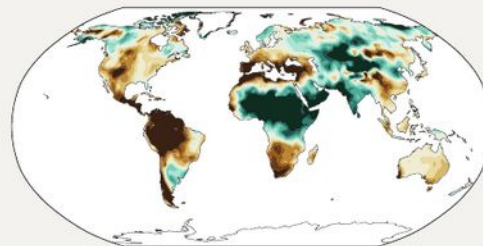
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 1,5°C



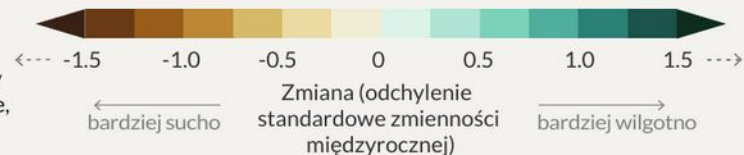
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 2°C



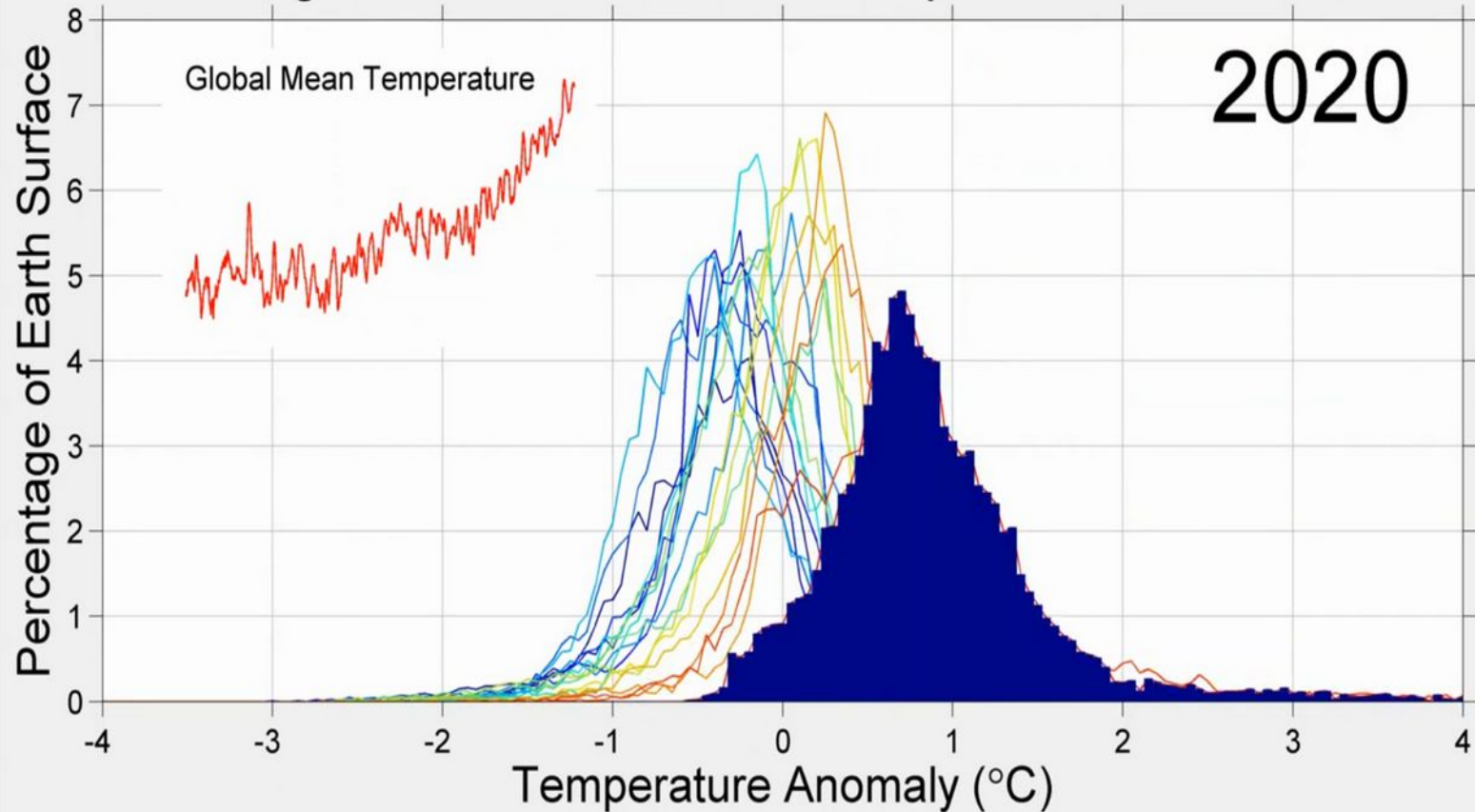
Symulowane zmiany dla globalnego ocieplenia o 4°C



Dla regionów suchych o małej zmienności warunków w poszczególnych latach, stosunkowo małe zmiany bezwzględne mogą jawić się jako duże, jeśli są wyrażone w jednostkach odchylenia standardowego.



# Changes in Earth's Surface Temperature Distribution



Data Source: 12-month surface temperature anomaly distributions from Berkeley Earth, relative to 1951-1980 average.

Częstotliwość występowania anomalii temperatury względem

okresu bazowego 1951–1980.

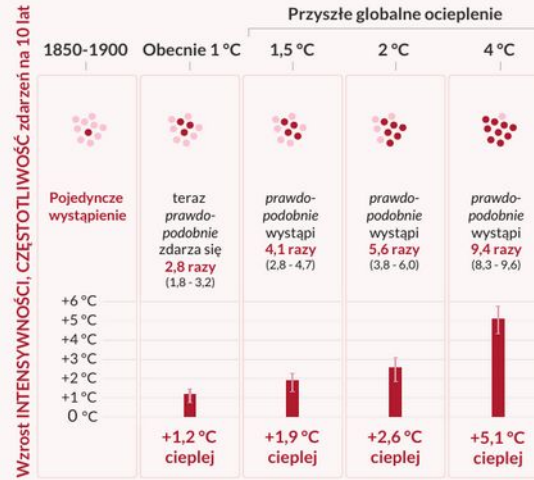
Rozkład rozszerza się, rośnie skośność po stronie

Intensywność i częstotliwość prognozowanych zmian w ekstremach rośnie z każdym postępowaniem globalnego ocieplenia

## Ekstremna ciepła nad lądami

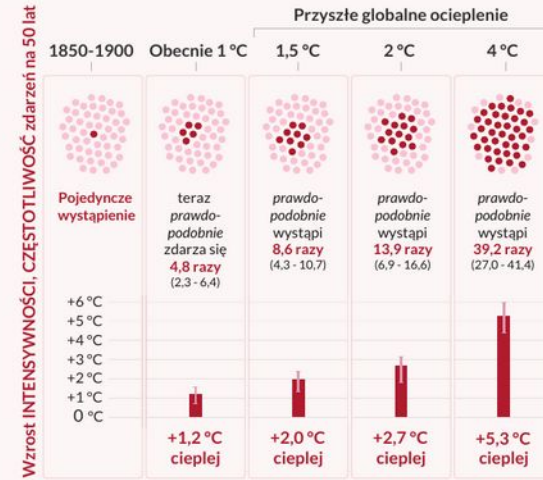
### Zdarzenie 10-letnie

Częstotliwość i wzrost intensywności ekstremów ciepła, które w klimacie bez wpływu człowieka występowały średnio raz na 10 lat



### Zdarzenie 50-letnie

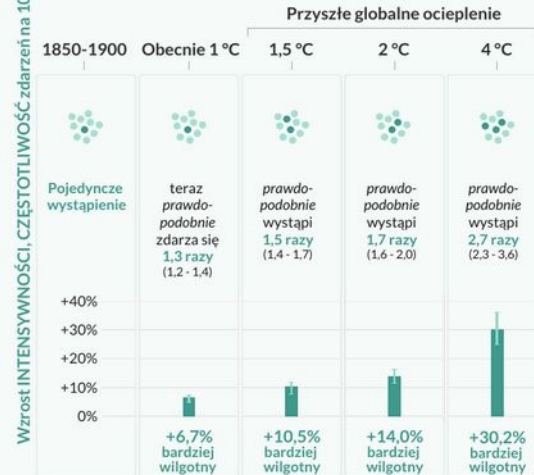
Częstotliwość i wzrost intensywności ekstremów ciepła, które w klimacie bez wpływu człowieka występowały średnio raz na 50 lat



## Ekstremna opadów nad lądami

### Zdarzenie 10-letnie

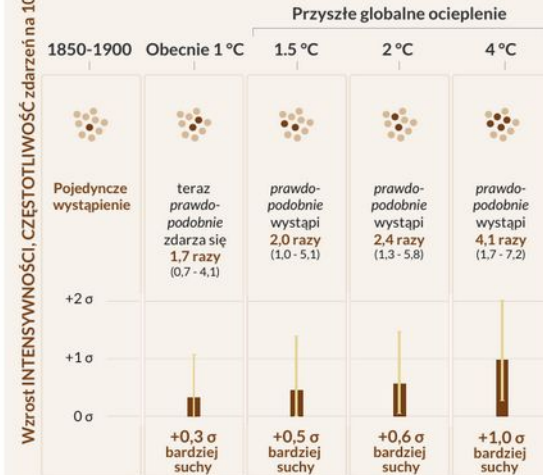
Częstotliwość i wzrost intensywności dobowych ekstremów opadowych, które w klimacie bez wpływu człowieka występowały średnio raz na 10 lat



## Susze rolnicze i środowiskowe w wysychających regionach

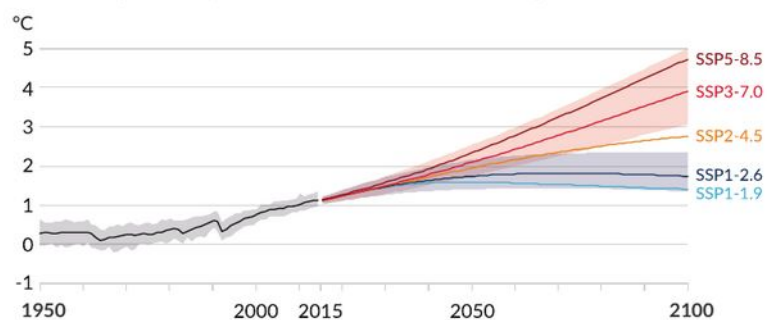
### Zdarzenie 10-letnie

Częstość występowania i wzrost intensywności susz rolniczych i hydrologicznych, które w klimacie bez wpływu człowieka występowały w regionach wysychających średnio raz na 10 lat

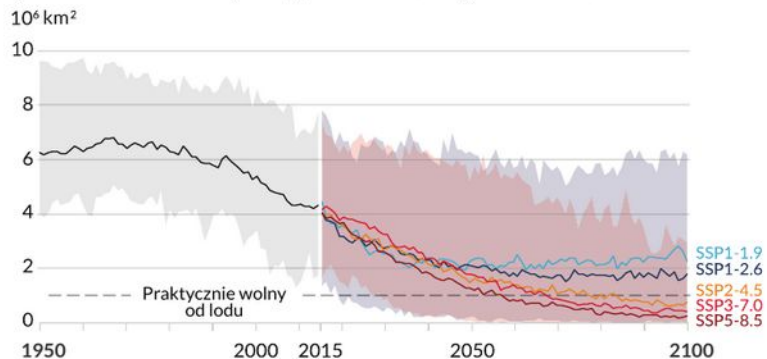


# Działalność człowieka wpływa na wszystkie główne składniki systemu klimatycznego, z których niektóre reagują w ciągu dekad, inne zaś w ciągu stuleci

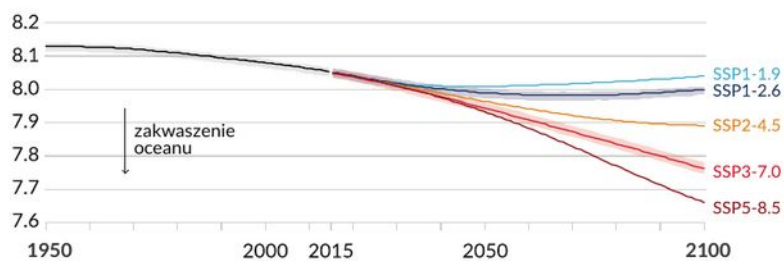
a) Zmiana globalnej temperatury powierzchni względem okresu 1850–1900



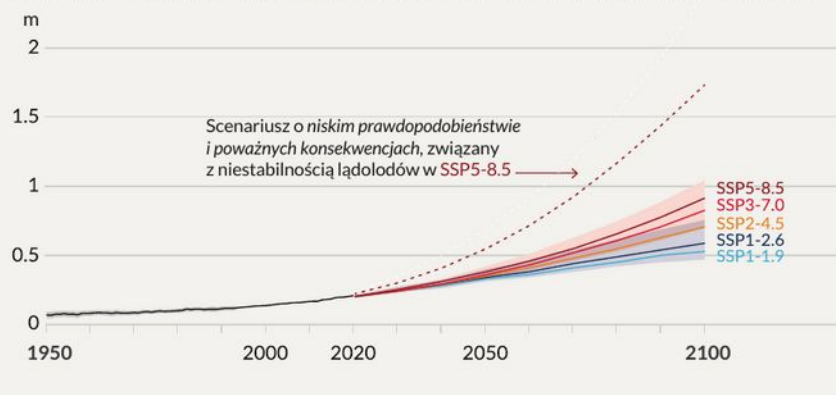
b) Powierzchnia arktycznego lodu morskiego we wrześniu



c) pH wód powierzchniowych Wszechocianu (miara zakwaszenia oceanu)

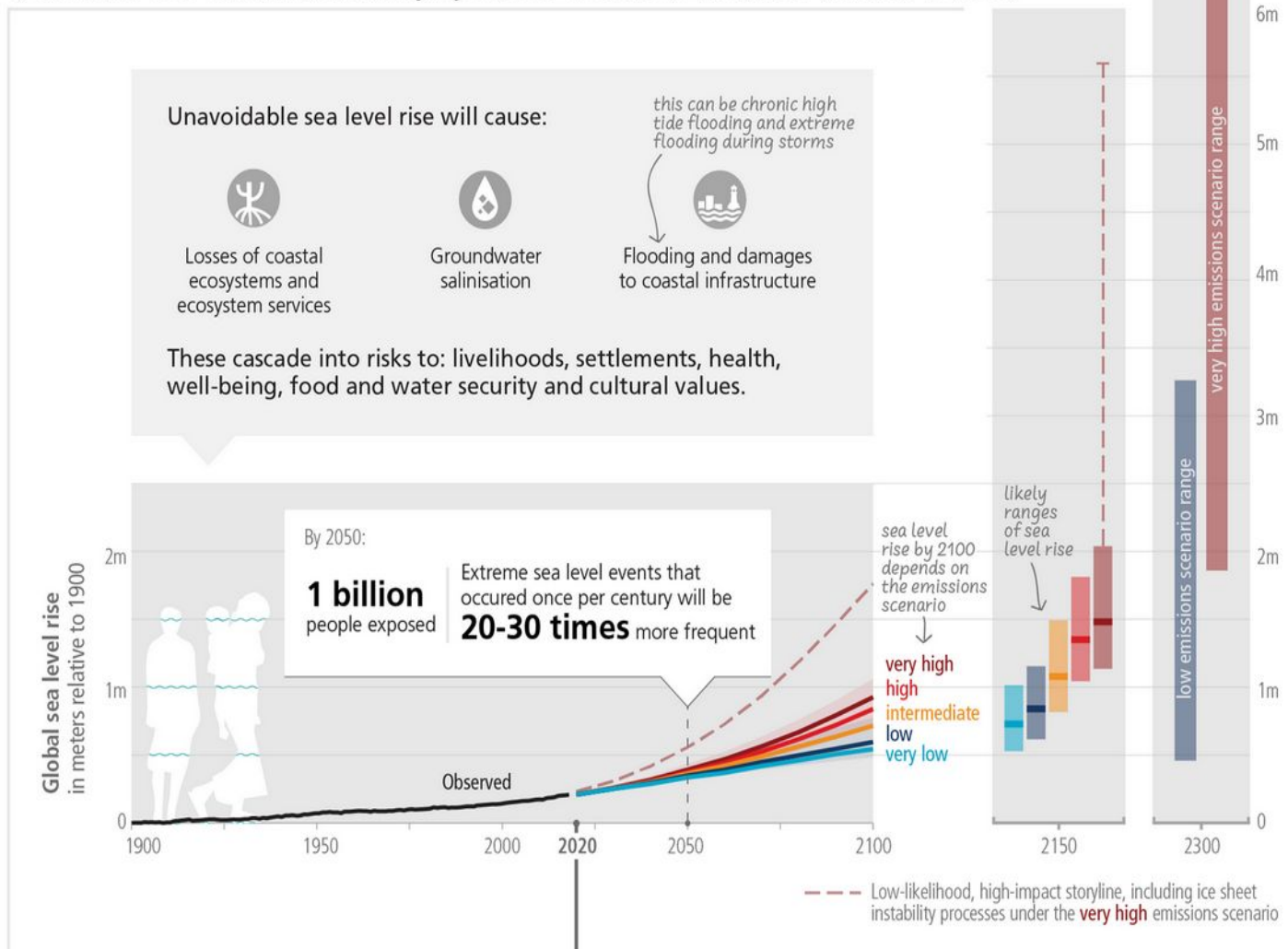


d) Zmiana średniego globalnego poziomu morza w stosunku do roku 1900

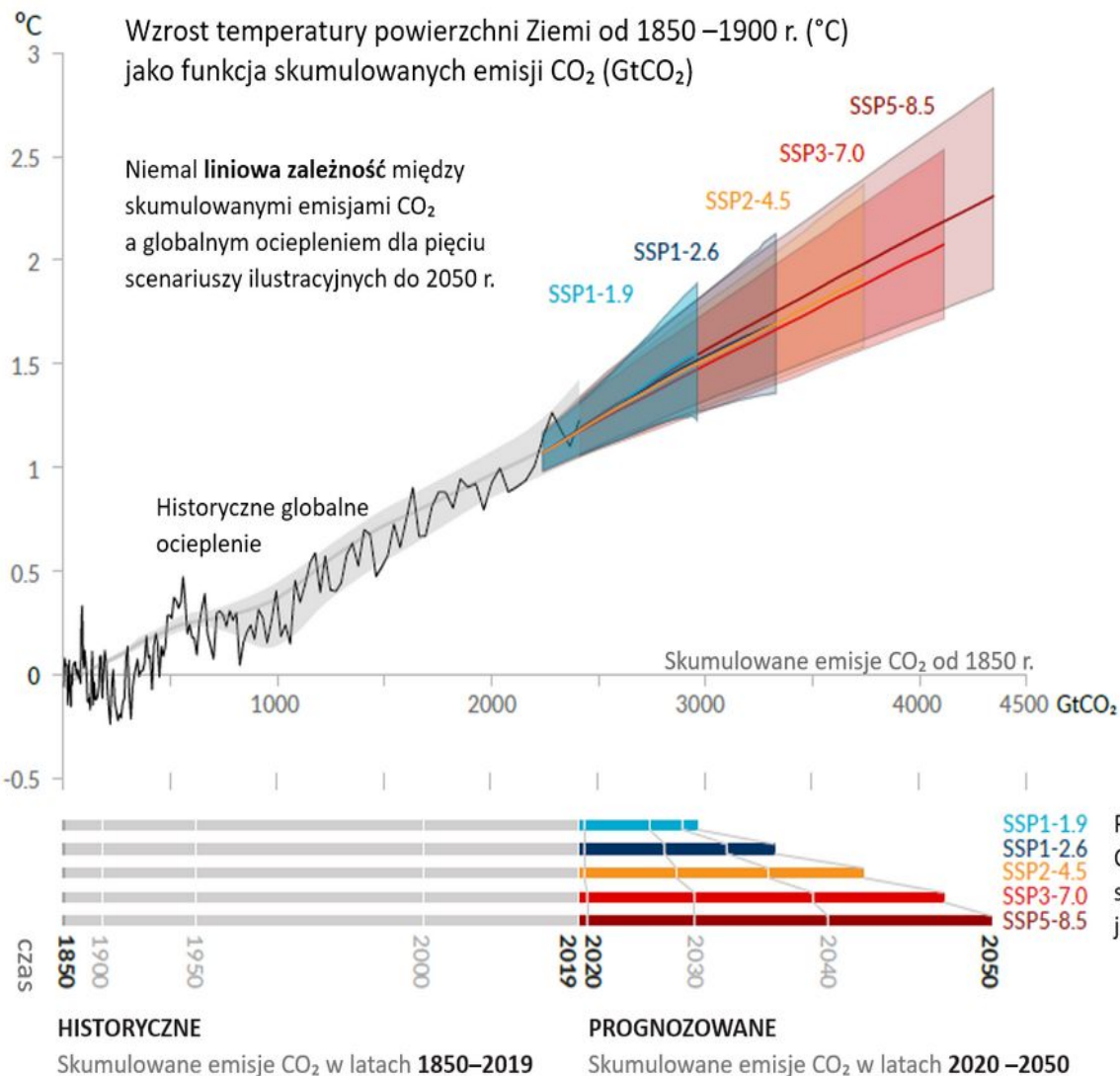


# Sea level rise will continue for millennia, but how fast and how much depends on future emissions

a) Sea level rise: observations and projections 2020-2100, 2150, 2300 (relative to 1900)



# Prawie liniowa zależność pomiędzy skumulowaną emisją CO<sub>2</sub> a wzrostem temperatury powierzchni Ziemi.

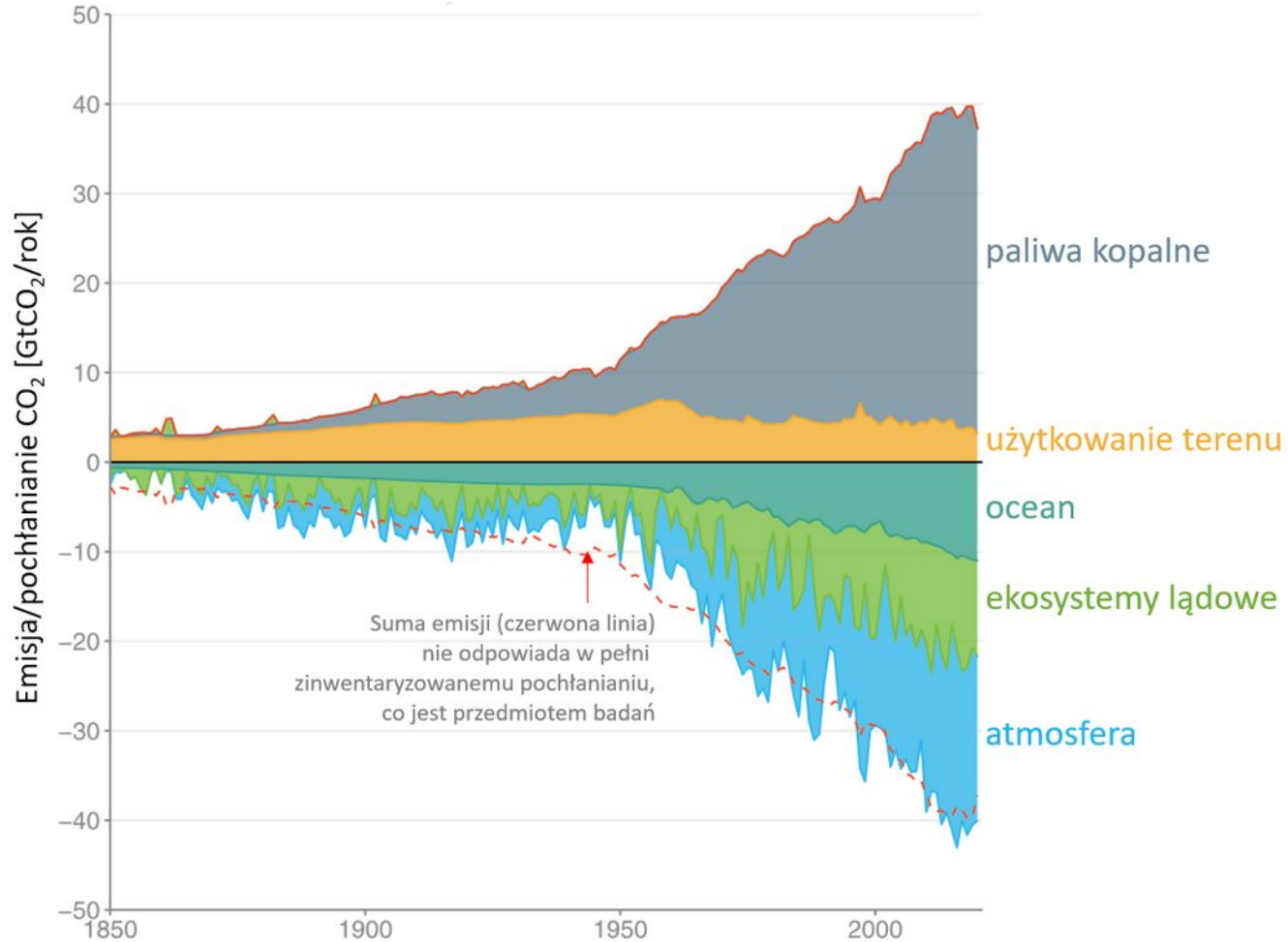


Panel górny:  
Dane historyczne (cienka czarna linia) - obserwowany wzrost globalnej temperatury powierzchni w °C od 1850 – 1900 w funkcji historycznych skumulowanych emisji dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>) od 1850 do 2019 roku wyrażonych w GtCO<sub>2</sub>. Szary zakres ze środkową linią - oszacowanie historycznego ocieplenia. Kolorowe obszary - bardzo prawdopodobny (95%) zakres prognoz temperatury, grube kolorowe linie środkowe - mediana szacunków.

Panel dolny:  
Historyczne i prognozowane skumulowane emisje CO<sub>2</sub> w GtCO<sub>2</sub> dla odpowiednich scenariuszy.

# Global carbon budget

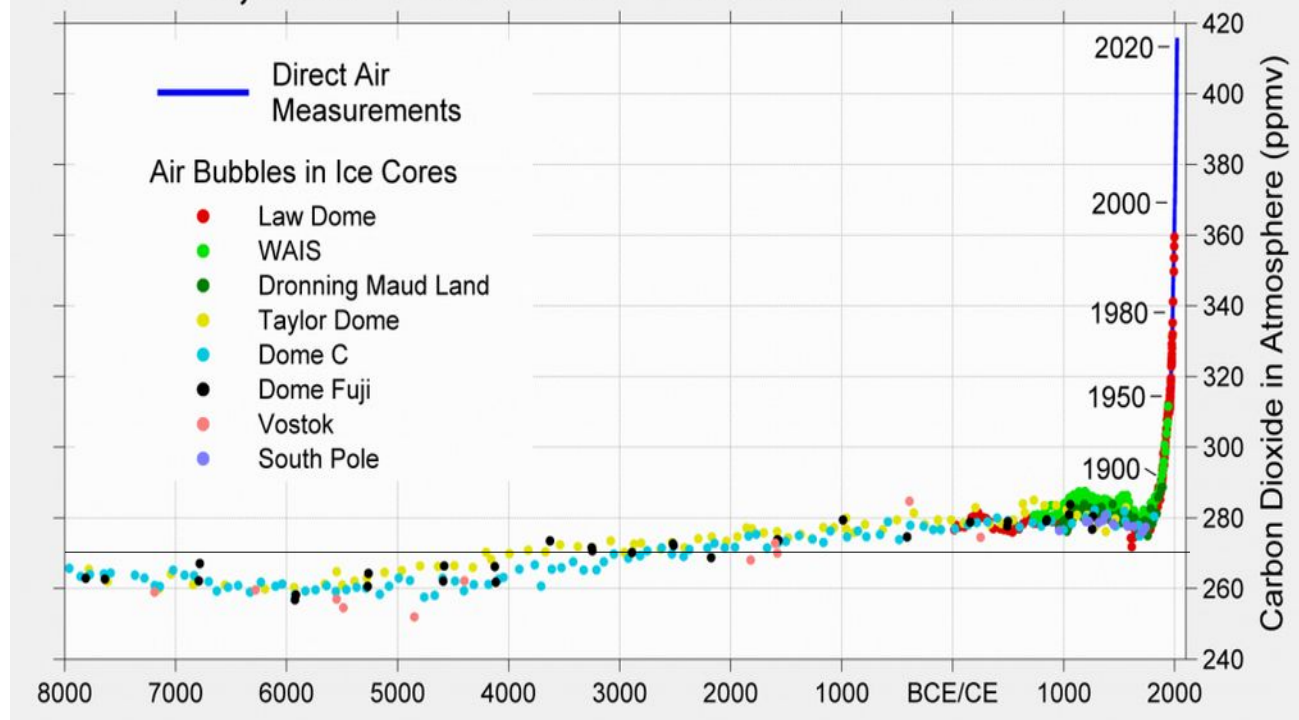
## Bilans emisji i pochłaniania CO<sub>2</sub>



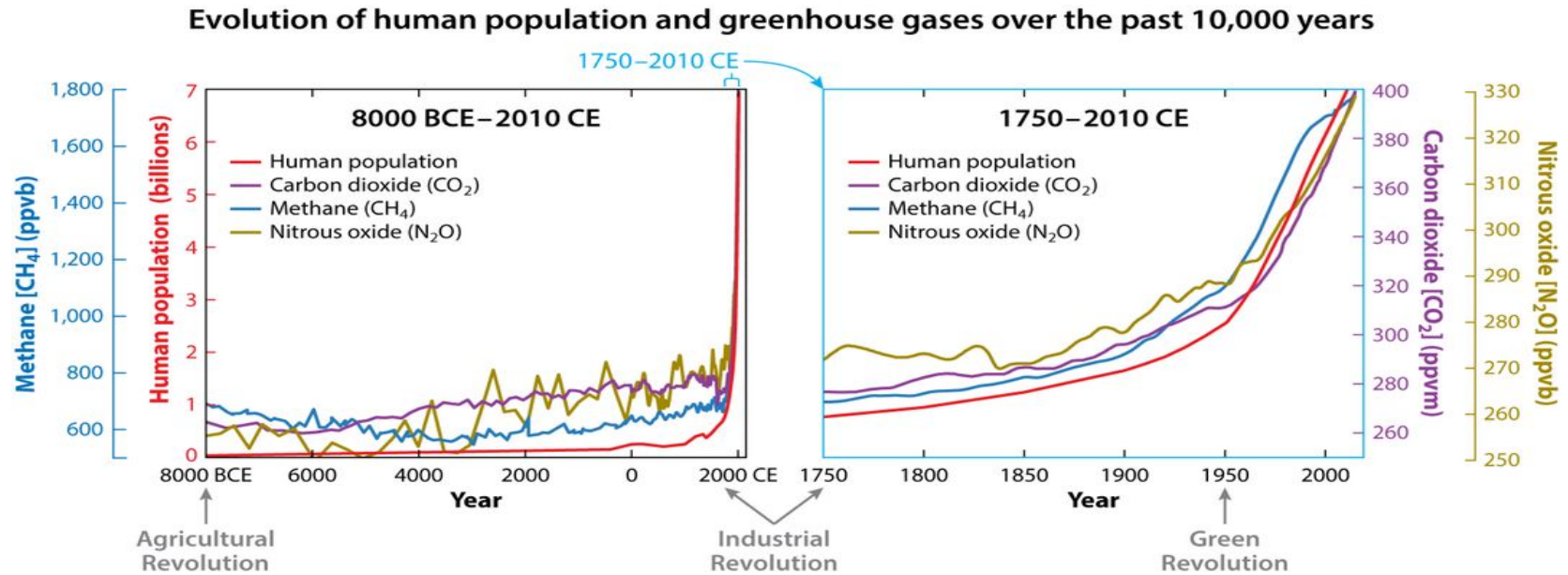
$$1 \text{ Gt CO}_2 = 0.2725 \text{ Gt C}$$



# 10,000 Years of Carbon Dioxide



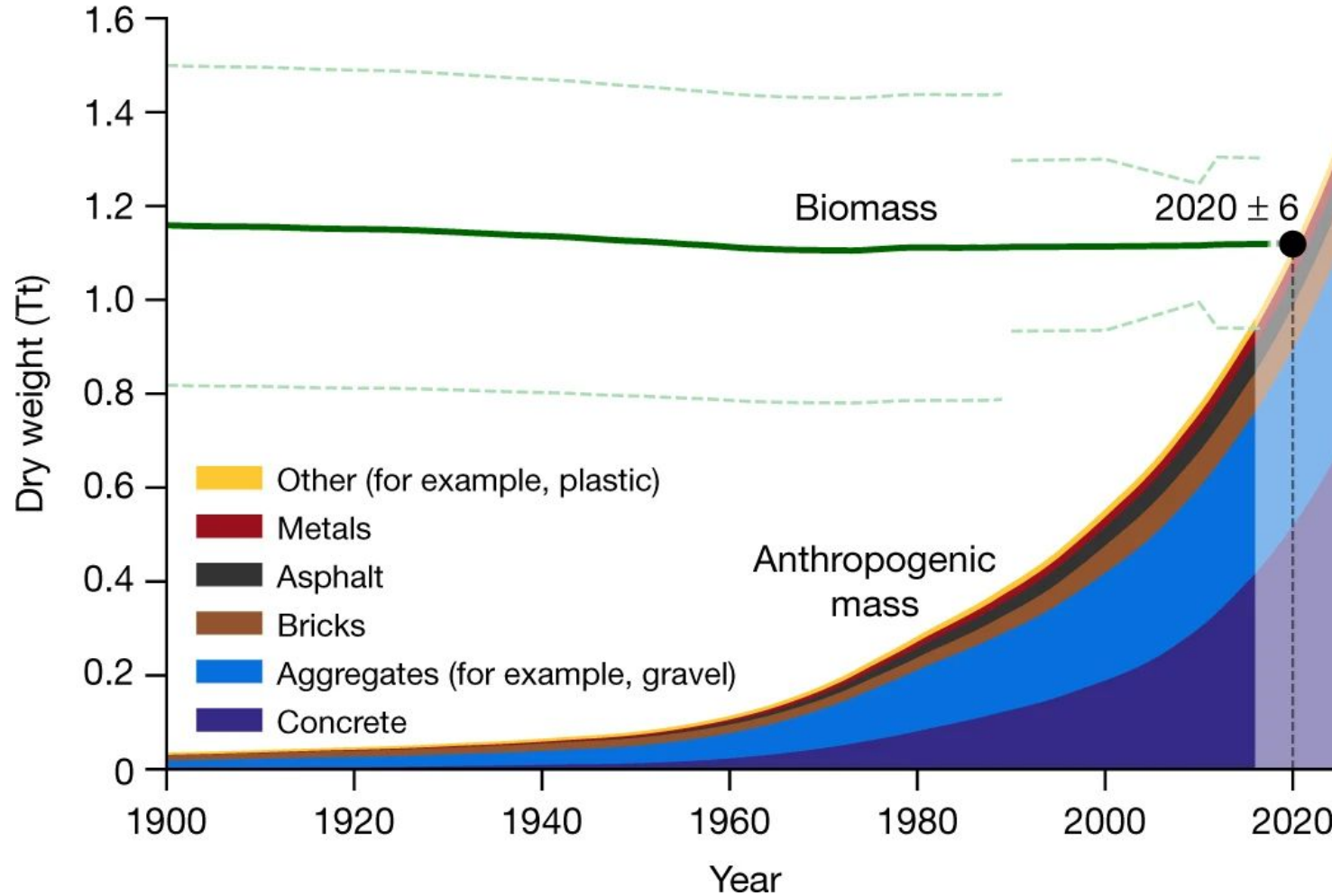
Koncentracja CO<sub>2</sub> w atmosferze w ciągu ostatnich 10 tysięcy lat. Oś pozioma - lata naszej ery (CE) i przed naszą erą (BCE). Oś pionowa - stężenie CO<sub>2</sub> w powietrzu.



The abrupt and simultaneous upward trajectories of human population and greenhouse gases after the start of the Industrial Revolution (~1750), and the distinct acceleration after the start of the Green Revolution (~1950), show that the Human System has become the primary driver of these gases and the changes in the Earth System.

Adapted from Fu & Li (2016), CC-BY, <https://doi.org/10.1093/nsr/nww094>.

# Masa wytworów antropogenicznych jest większa niż masa wszystkich żyjących organizmów



Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J. et al. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature* 588, 442–444 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>

# Nie tylko temperatura - raport IPBES na temat bioróżnorodności:

## DRIVERS

### INDIRECT DRIVERS

Values and behaviours

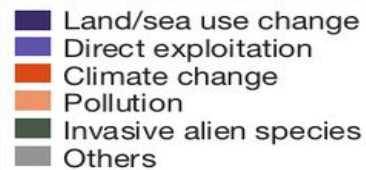
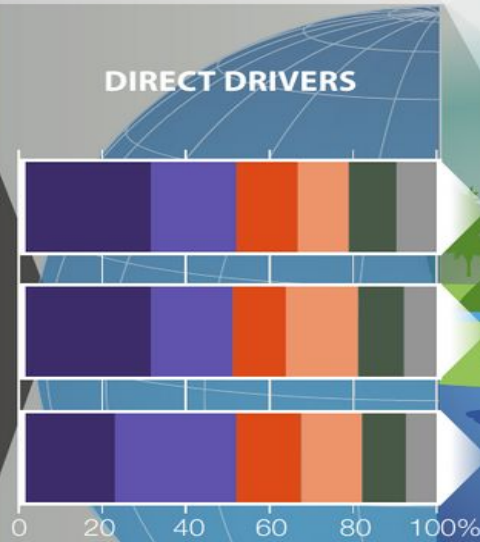
Demographic and sociocultural

Economic and technological

Institutions and governance

Conflicts and epidemics

### DIRECT DRIVERS



## EXAMPLES OF DECLINES IN NATURE

### ECOSYSTEM EXTENT AND CONDITION

47%

Natural ecosystems have **declined by 47 per cent** on average, relative to their earliest estimated states.

### SPECIES EXTINCTION RISK

25%

Approximately **25 per cent of species are already threatened with extinction** in most animal and plant groups studied.

### ECOLOGICAL COMMUNITIES

23%

Biotic integrity—the abundance of naturally-present species—has **declined by 23 per cent** on average in terrestrial communities.\*

### BIOMASS AND SPECIES ABUNDANCE

82%

The global biomass of wild mammals has **fallen by 82 per cent.\*** Indicators of vertebrate abundance have declined rapidly since 1970

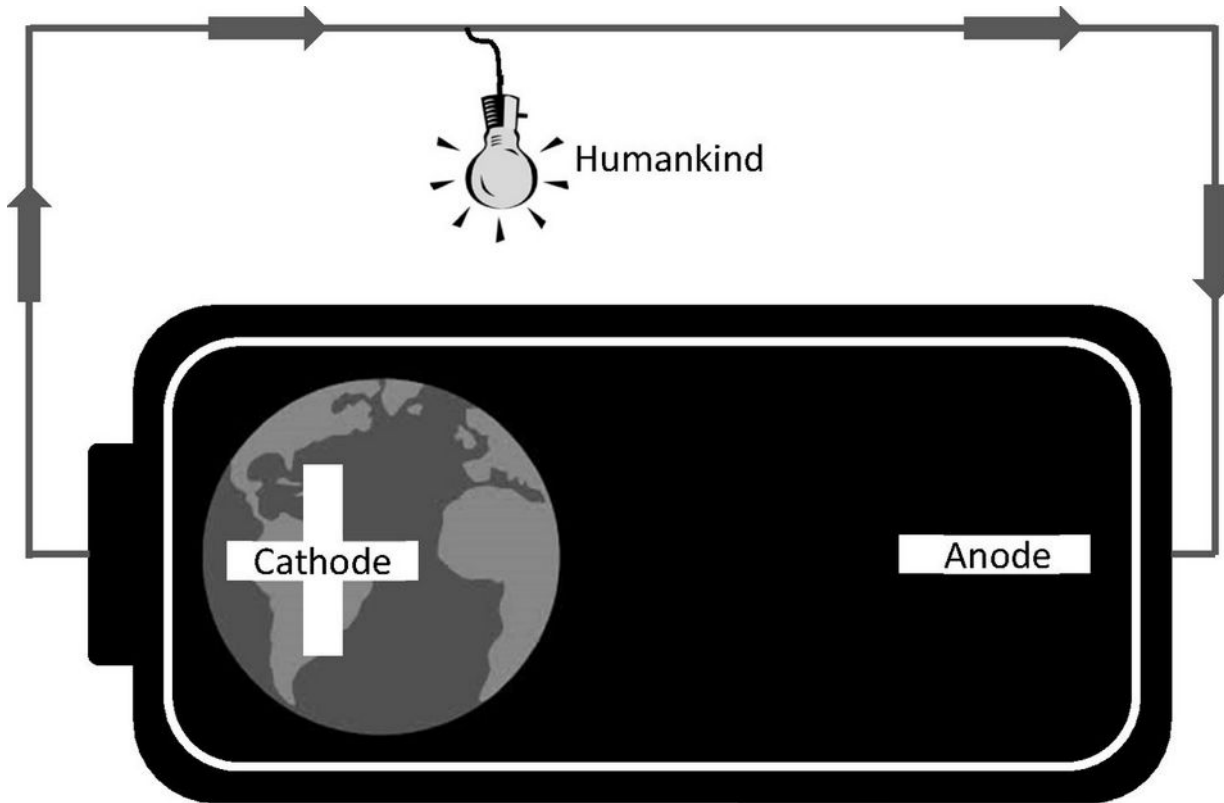
### NATURE FOR INDIGENOUS PEOPLES AND LOCAL COMMUNITIES

72%

72 per cent of indicators developed by indigenous peoples and local communities show **ongoing deterioration** of elements of nature important to them

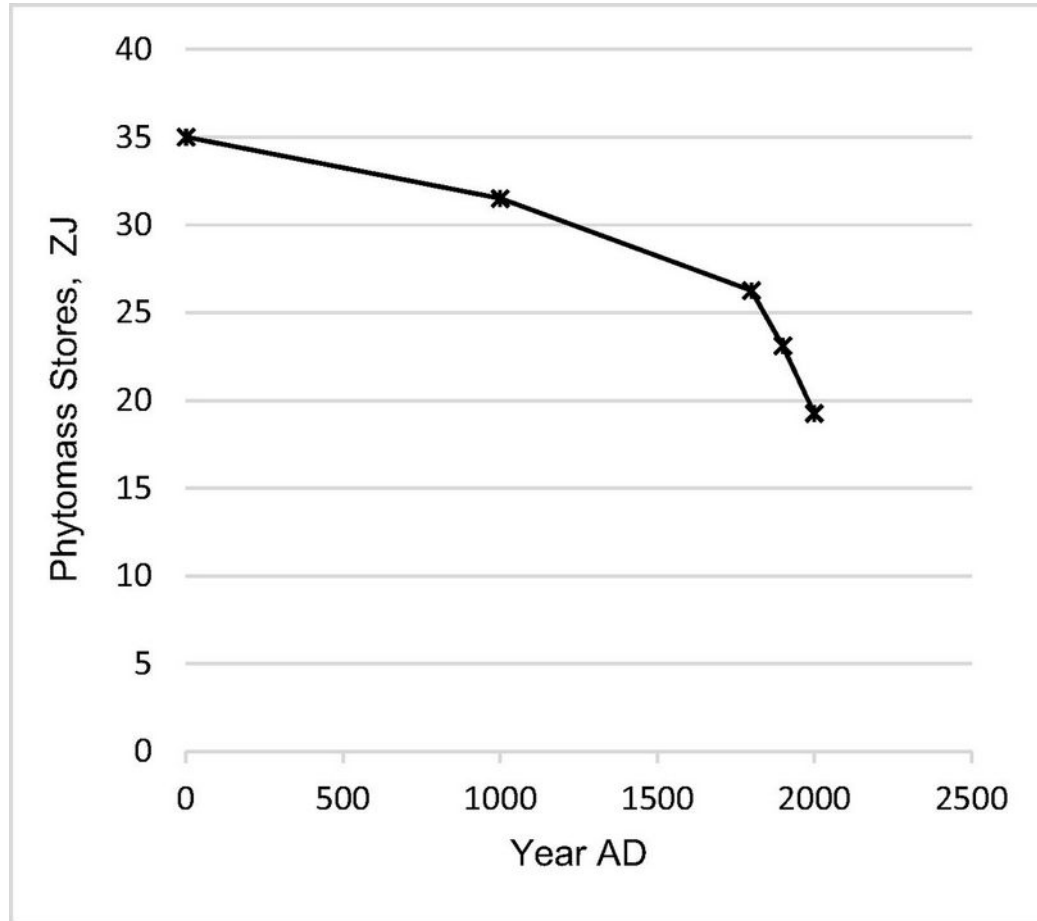
\* Since prehistory

Spadek biomasy (brązowe pole z wykresu z budżetem węgla)).



Schramski/Delaney 2015

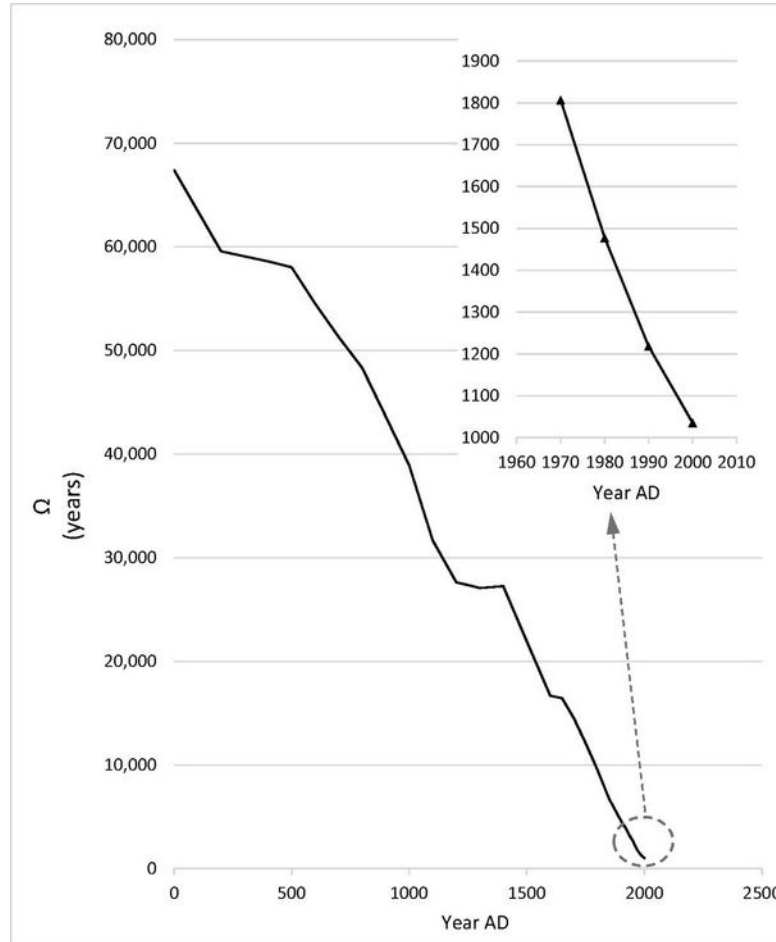
**Spadek biomasy (brązowe pole z wykresu z budżetem węgla)).**

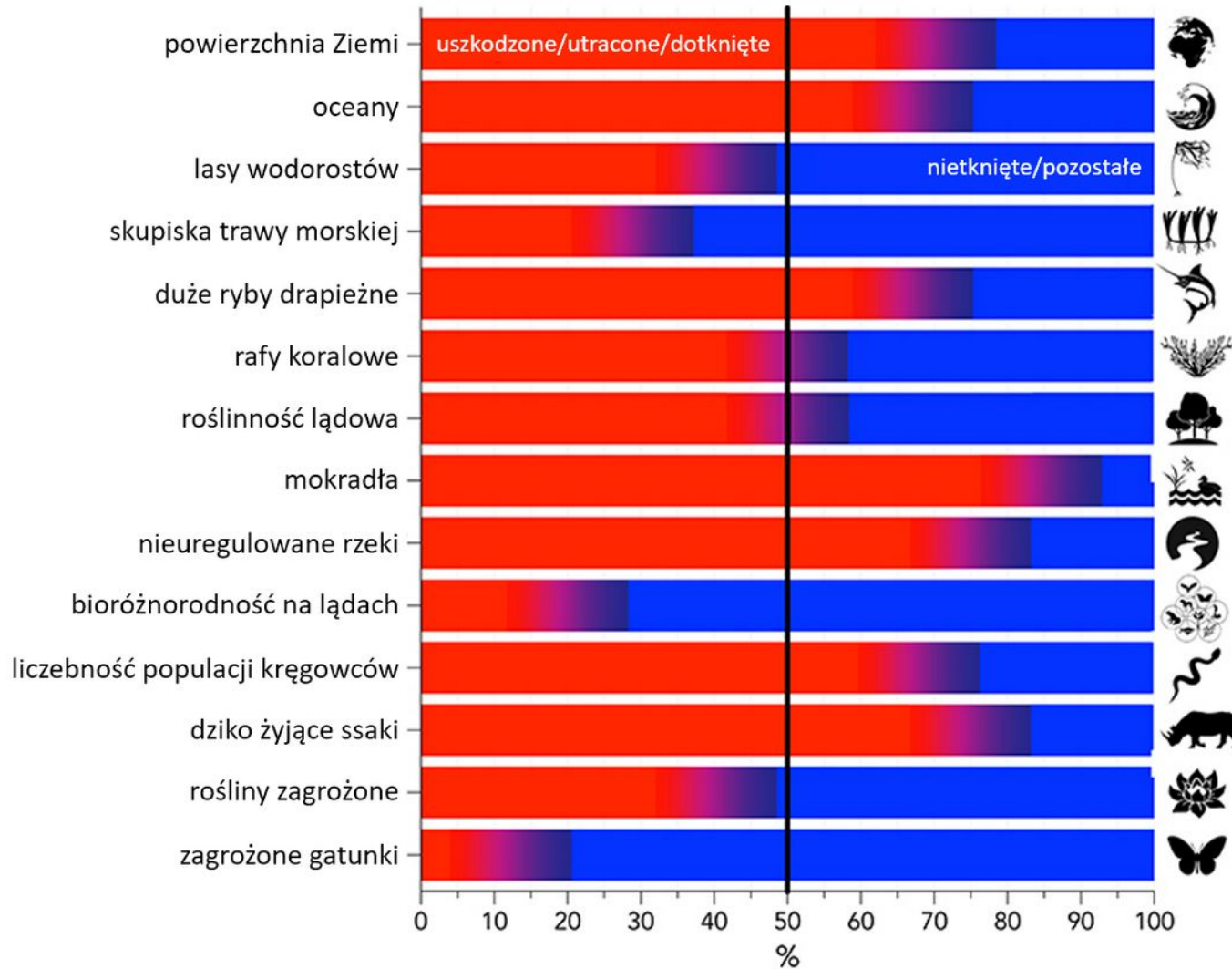


Maksymalna liczba lat na które przy stanie populacji i biomasy z danego roku wystarczyłyby zasoby masy roślinnej, gdyby całe służyły jedynie żywieniu populacji.

$$\Omega = \frac{P}{BN}$$

P - energia chemiczna w biomasie  
 B - populacja  
 N - zapotrzebowanie metaboliczne pojedynczego człowieka w ciągu roku





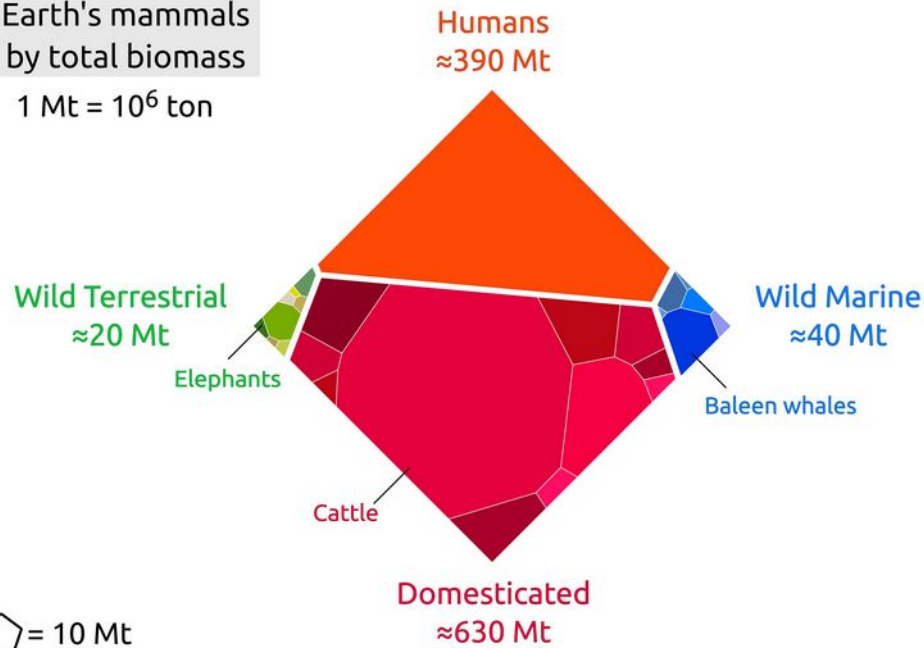
## Underestimating the Challenges of Avoiding a Ghastly Future

Corey J. A. Bradshaw<sup>1,2\*</sup>, Paul R. Ehrlich<sup>3\*</sup>, Andrew Beattie<sup>4</sup>, Gerardo Ceballos<sup>5</sup>, Eileen Crist<sup>6</sup>, Joan Diamond<sup>7</sup>, Rodolfo Dirzo<sup>8</sup>, Anne H. Ehrlich<sup>9</sup>, John Harte<sup>10</sup>, Mary Ellen Harte<sup>11</sup>, Graham Pyke<sup>12</sup>, Peter H. Raven<sup>13</sup>, William J. Ripple<sup>14</sup>, Frédéric Saltré<sup>1,2</sup>, Christine Turnbull<sup>15</sup>, Mathis Wackernagel<sup>16</sup> and Daniel T. Blumstein<sup>13,14\*</sup>

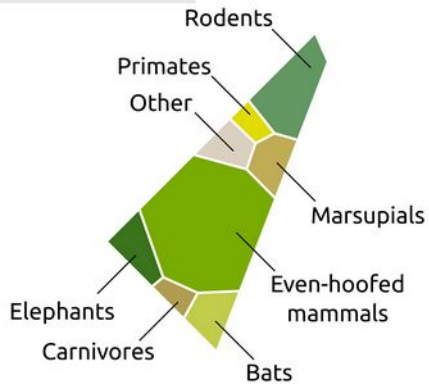
Podsumowanie wpływu ludzkości na wybrane elementy biosfery. Kolor niebieski oznacza ułamek (procent) niedotknięty/niezniszczony przez działalność człowieka, czerwony – zniszczony lub zaburzony.

Earth's mammals  
by total biomass

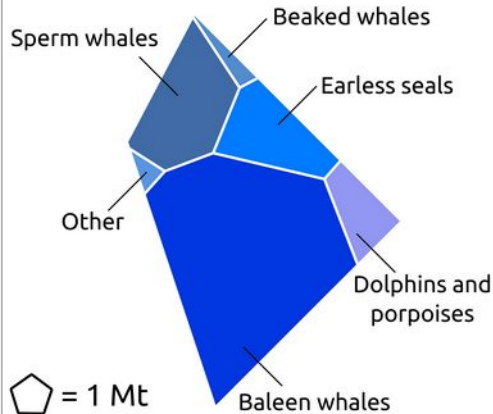
1 Mt = 10<sup>6</sup> ton



Wild Terrestrial  
zoom in



Wild Marine  
zoom in

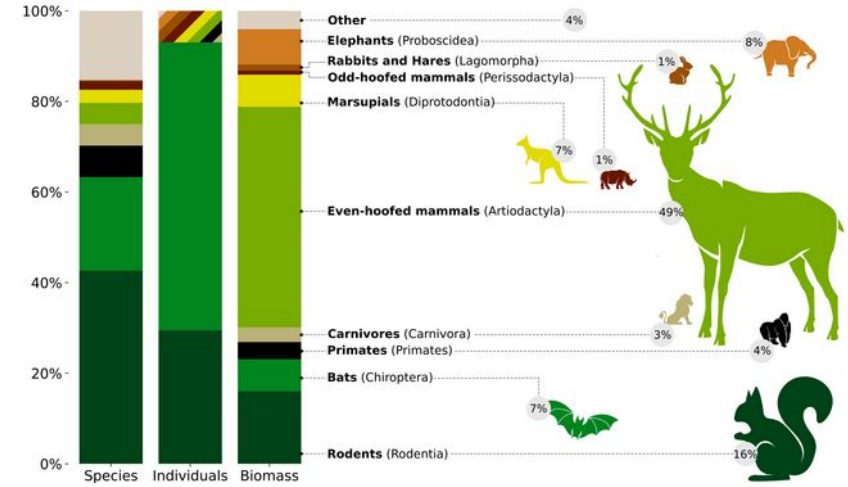


# The global biomass of wild mammals

Lior Greenspoon, Eyal Krieger, Ron Sender, +7, and Ron Milo Authors Info & Affiliations

Edited by Pablo Marquet, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile; received March 20, 2022; accepted January 2, 2023

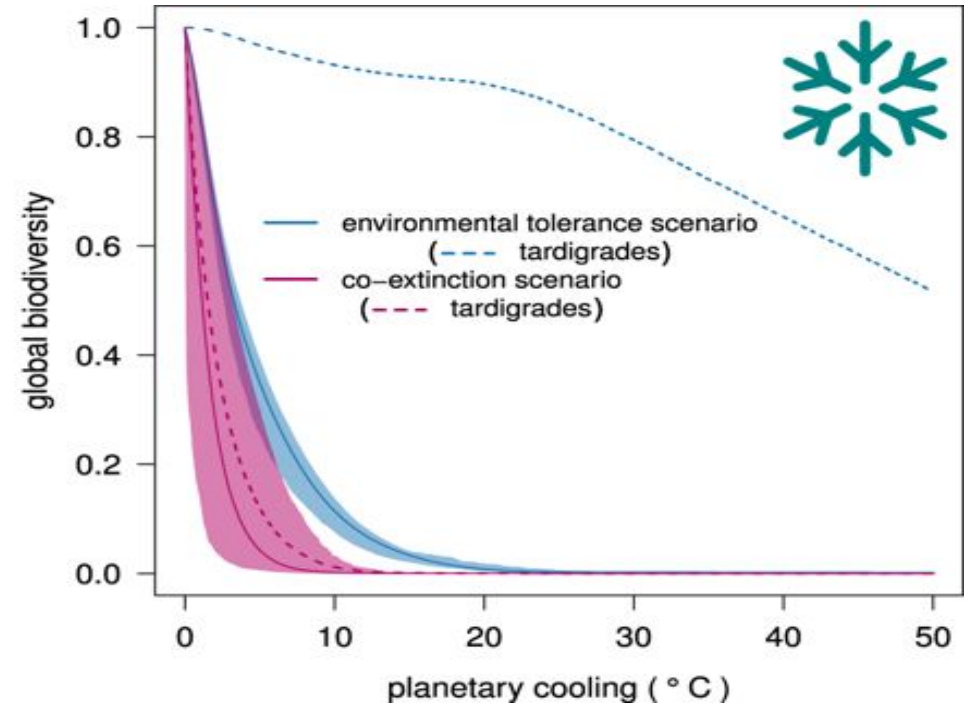
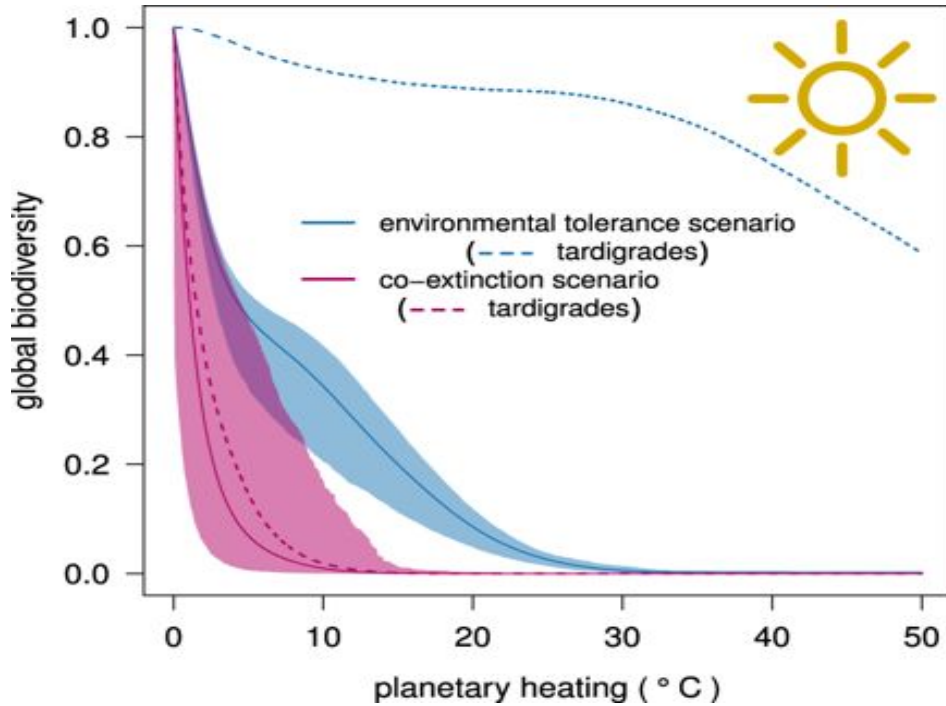
February 27, 2023 | 120 (10) e2204892120 | <https://doi.org/10.1073/pnas.2204892120>



The global biomass distribution of the mammalian class, represented by a Voronoi diagram.

The area of each cell is proportional to the biomass contribution of each group.

To compare: ants are equivalent to ~80 Mt of biomass.



Co-extinctions reduce the robustness of planetary life to catastrophe. Response of global diversity to environmental change: progressive, monotonic increase ('planetary heating'; left panel) or decrease ('planetary cooling'; right panel) trajectories in local temperature. Species either go extinct based only on their tolerance to environmental conditions ('environmental tolerance' scenarios = blue curves), or where species go extinct not only when unable to cope with changed environmental conditions, but also following the depletion of their essential resources ('co-extinction' scenarios = magenta curves)



„Przedstawiamy trzy główne kwestie środowiskowe przed którymi stoimy, którym poświęcono niewiele uwagi, a które wymagają pilnych działań:

### Underestimating the Challenges of Avoiding a Ghastly Future

Corey J. A. Bradshaw<sup>1,2\*</sup>, Paul R. Ehrlich<sup>2\*</sup>, Andrew Beattie<sup>4</sup>, Gerardo Ceballos<sup>5</sup>, Eileen Crist<sup>6</sup>, Joan Diamond<sup>7</sup>, Rodolfo Dirzo<sup>8</sup>, Anne H. Ehrlich<sup>9</sup>, John Harte<sup>6,8</sup>, Mary Ellen Harte<sup>8</sup>, Graham Pyke<sup>4</sup>, Peter H. Raven<sup>10</sup>, William J. Ripple<sup>11</sup>, Frédéric Saltré<sup>1,2</sup>, Christine Turnbull<sup>4</sup>, Mathis Wackernagel<sup>12</sup> and Daniel T. Blumstein<sup>13,14\*</sup>

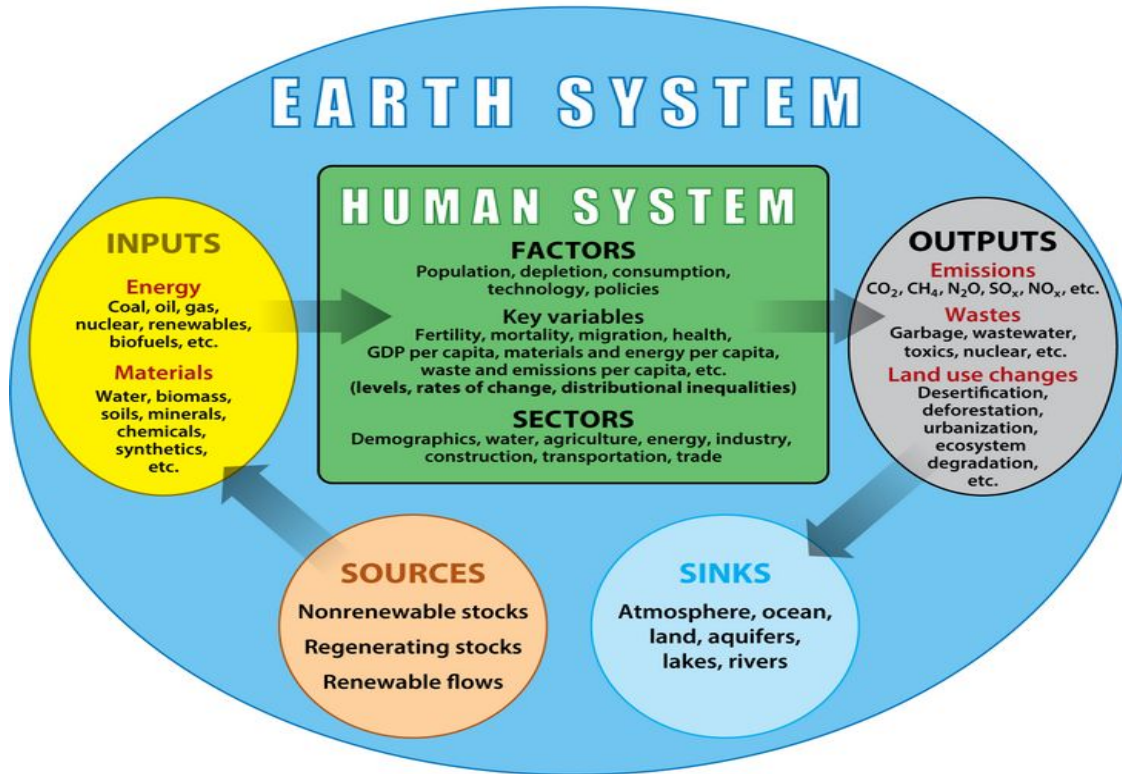
1) dowodzimy, że przyszłe warunki środowiskowe będą o wiele bardziej niebezpieczne niż się obecnie uważa, skala zagrożeń ... jest w rzeczywistości tak wielka, że trudno ją ogarnąć nawet dobrze poinformowanym ekspertom;

2) pytamy, jaki system polityczny lub ekonomiczny, czy też przywództwo jest przygotowane do stawienia czoła przewidywanym katastrofom, i zdolne do podjęcia odpowiednich działań;

3) stwierdzamy, że ta dramatyczna sytuacja nakłada na naukowców niezwykłą odpowiedzialność za szczere i precyzyjne wypowiedzanie się w kontaktach z rządem, biznesem i opinią publiczną.

Zwracamy szczególną uwagę na brak zrozumienia ogromnych wyzwań związanych z zapewnieniem zrównoważonej przyszłości. Narastające obciążenia dla zdrowia, bogactwa i dobrobytu będą przewrotnie zmniejszać naszą polityczną zdolność do łagodzenia erozji usług ekosystemowych, od których zależy społeczeństwo. Wiedza naukowa leżąca u podstaw tych kwestii jest bogata, ale świadomość jej jest słaba. Bez pełnego docenienia i rozpowszechnienia informacji o skali problemów i ogromu wymaganych rozwiązań, społeczeństwo nie zdoła osiągnąć nawet skromnych celów zrównoważonego rozwoju.”

## Human System – Earth System relationship



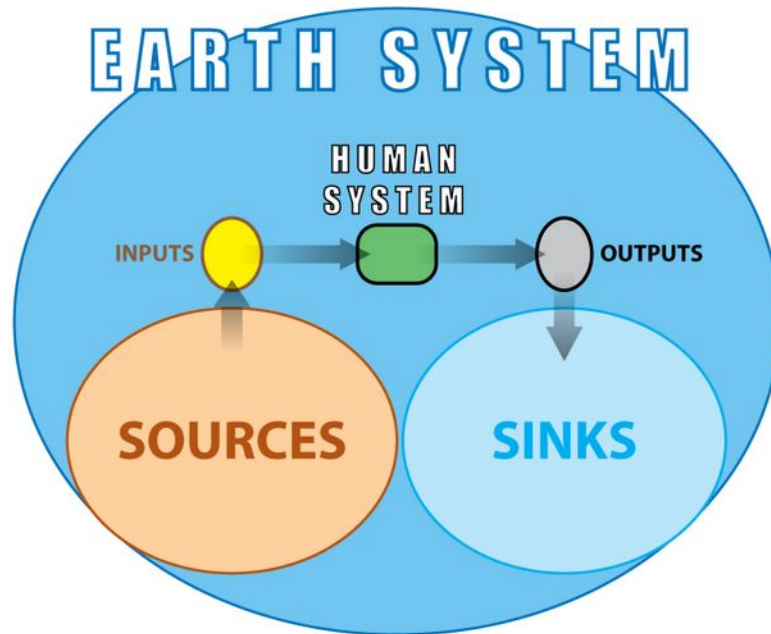
The Human System is within the Earth System: The Earth System provides the sources of the inputs to, and the sinks that absorb the outputs of, the Human System. However, current models are not bidirectionally coupled. Adapted from Motescharrei et al. (2016), CC-BY, <https://doi.org/10.1093/nsr/nww081>.

 Mote S, et al. 2020.  
Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 48:657–83

Annual Reviews

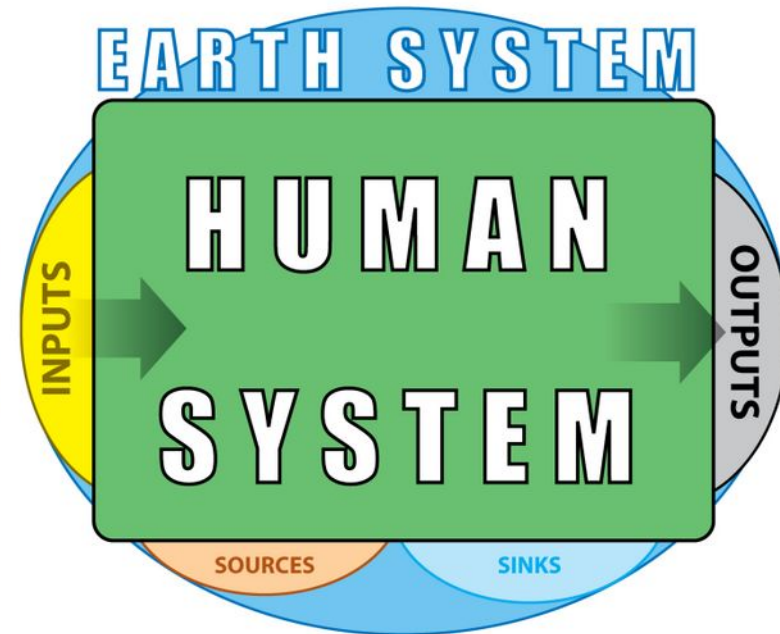
## The past: “Empty World” → The present: “Full World”

When the Human System was small relative to the Earth System, the two could be modeled separately.



Capacity of Earth System sources was large relative to Human System inputs. Human System outputs were small relative to absorption capacity of Earth System sinks.

The Human System has grown so large that both must now be modeled coupled to each other.



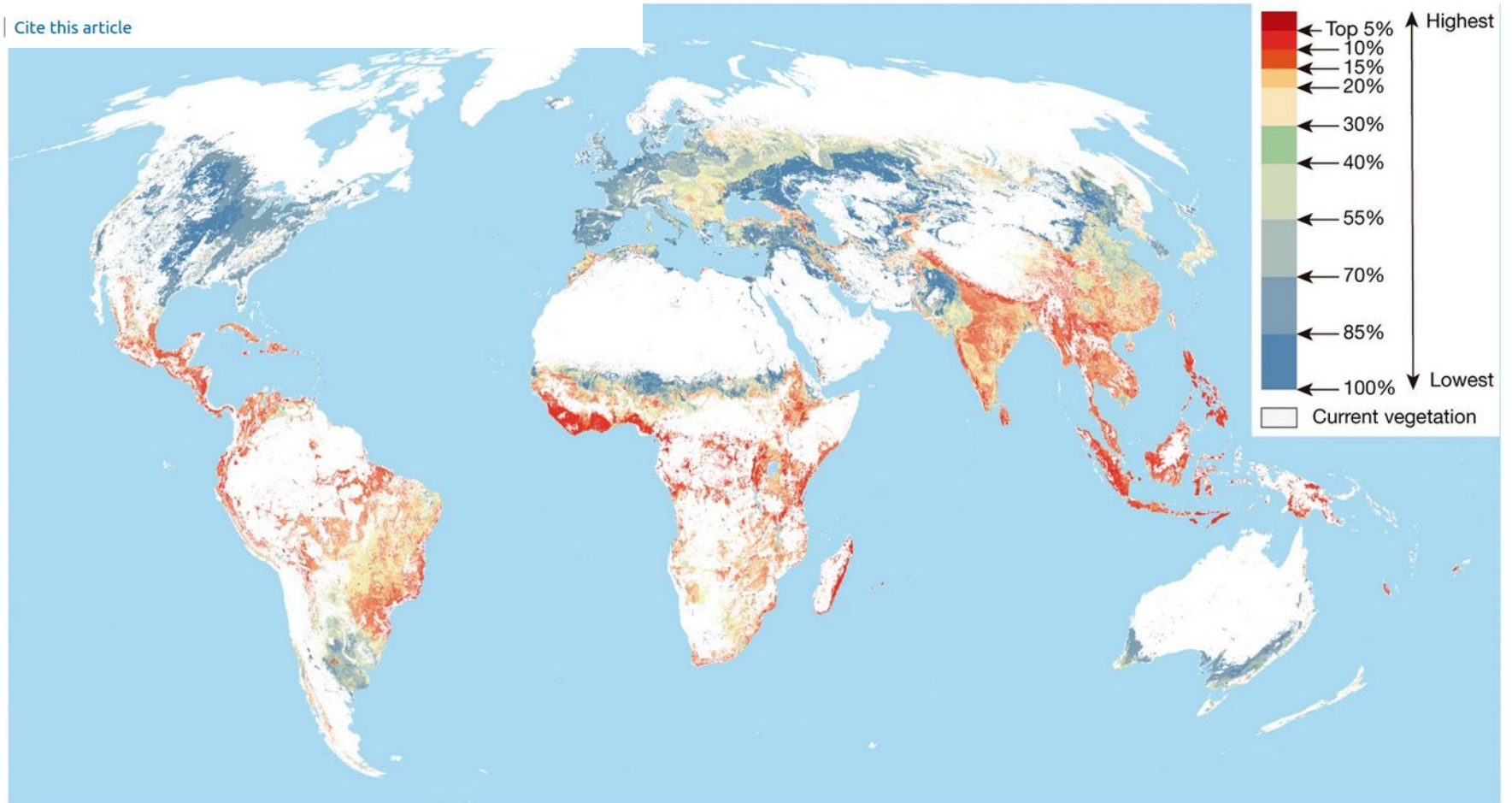
Now, Human System inputs and outputs are so large relative to the Earth System, they threaten to deplete its sources and overwhelm its sinks.

Adapted from Motescharrei et al. (2016), CC-BY, <https://doi.org/10.1093/nsr/nww081>.

# Global priority areas for ecosystem restoration

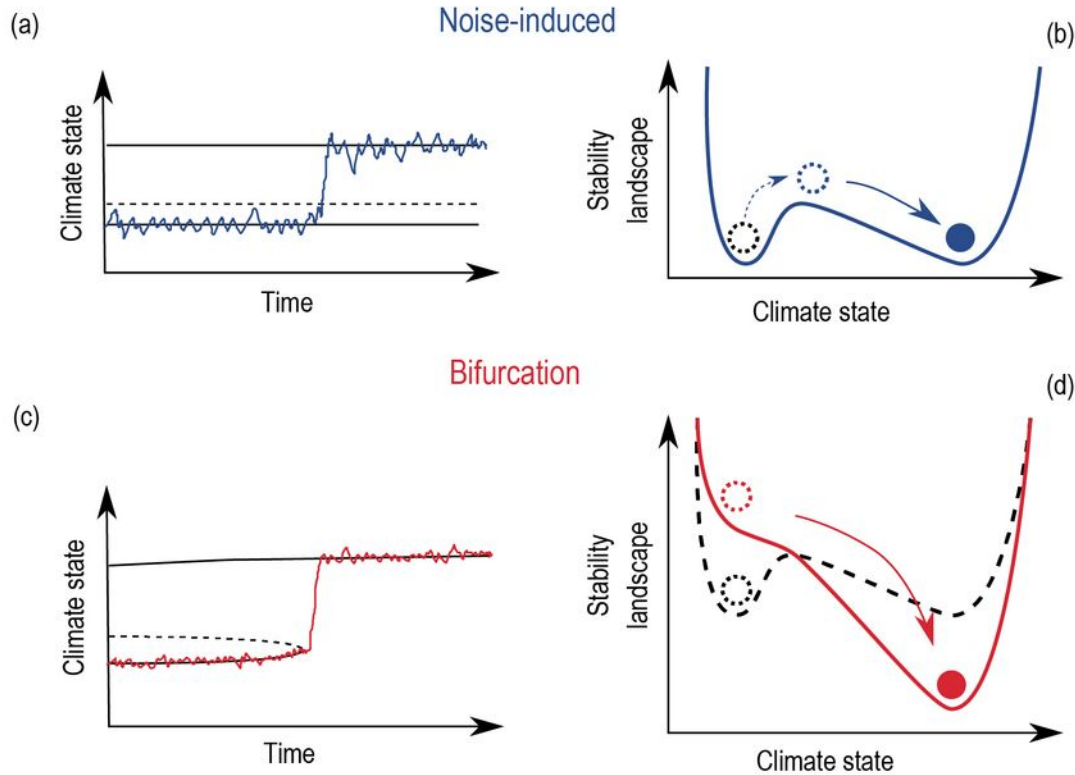
Bernardo B. N. Strassburg , Alvaro Iribarrem, [...] Piero Visconti

*Nature* (2020) | [Cite this article](#)



Priorytety przywracania i zachowania bioróżnorodności

# Changes resulting from forcings and feedbacks, if pass tipping points, may lead to new feedbacks and cascade effects.



Lenton, T. M., H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, and H. J. Schellnhuber, Tipping elements in the Earth's climate system, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 1786–1793 (2008).

Ghil, M., V. Lucarini, The physics of climate variability and climate change, *Rev. Mod. Phys.* 92, 035002 (2020).

Punkt krytyczny w ziemskim systemie klimatycznym – wartość lub szybkość zmiany wartości (próg) przekroczenie której może prowadzić do znaczącej zmiany klimatu, która może być nieodwracalna. Występujące w systemie dodatnie sprzężenie zwrotne może prowadzić do przyspieszenia, nieodwracalnych zmian systemu. Potencjalne punkty krytyczne zidentyfikowano zarówno w geofizycznych częściach systemu klimatycznego, jak i w dotkniętych zmianami ekosystemach.

Przykładowo, naturalne cykliczne zmiany orbity Ziemi inicjują sprzężenia zwrotne cyklu węglowego, które prowadzą do przejść między epoką lodowcową i międzylodowcową. Geologiczny zapis temperatury Ziemi notuje wiele przykładów szybkich przejść pomiędzy różnymi stanami klimatycznymi.

Punkty krytyczne są szczególnie istotne w odniesieniu do obaw związanych z globalnym ociepleniem. Potencjalne skutki uruchomienia sprzężeń zwrotnych są modelowane a modele weryfikowane na podstawie zachowań ziemskiego systemu klimatycznego w przeszłości. Zainicjowane przez działalność ludzką zmiany naturalnego obiegu węgla i ziemskiego albedo mogą skutkować lawinowym przekraczaniem kolejnych punktów krytycznych, co doprowadzi planetę do cieplarnianego stanu klimatycznego.

Wielkoskalowe elementy ziemskiego systemu, które mogą przekroczyć punkt krytyczny, nazywane są elementami krytycznymi. Przykładami takich elementów są pokrywy lodowe Grenlandii i Antarktydy, których kurczenie się może spowodować podniesienie poziomu morza o dziesiątki metrów.

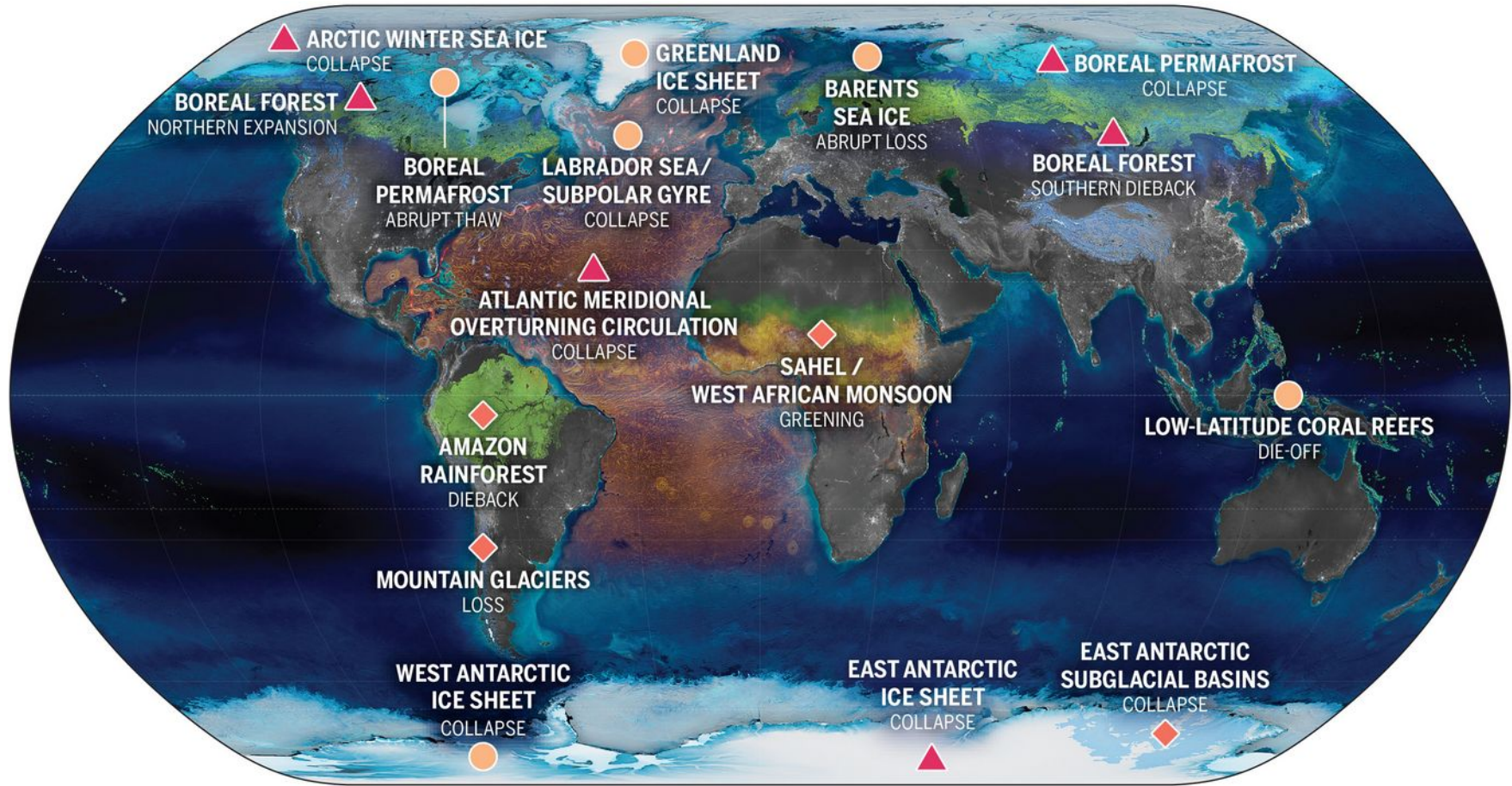
Skutki przekroczenia punktu krytycznego nie muszą być natychmiastowe, pojemność cieplna wprowadza bezwładność do układu. Przykładowo, przy wzroście temperatury nieuniknione będzie stopienie części pokrywy lodowej Grenlandii i Antarktydy Zachodniej. Sama pokrywa lodowa może jednak utrzymywać się jeszcze przez wiele stuleci.

# Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points

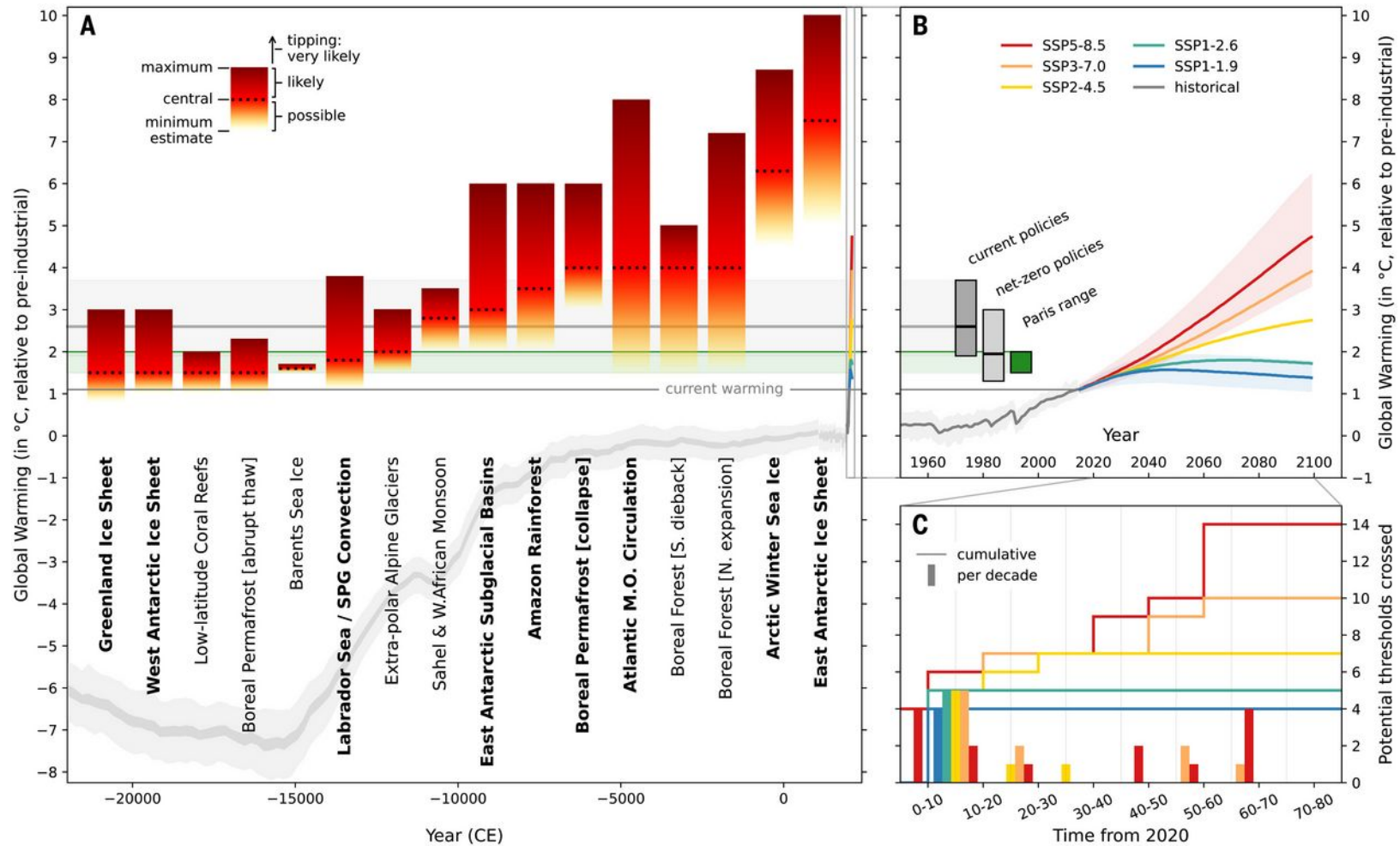
DAVID I. ARMSTRONG MCKAY, ARIE STAAI, JESSE F. ABRAMS, RICARDA WINKELMANN, BORIS SAKSHEWSKI, SINA LORIANI, INGO FETZER, SARAH E. CORNELL, JOHAN ROCKSTRÖM, AND TIMOTHY M. LENTON

[fewer](#) [Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE • 9 Sep 2022 • Vol 377, Issue 6611 • DOI:10.1126/science.aba7950



**GLOBAL WARMING THRESHOLDS**  
 ● <math><2^{\circ}\text{C}</math>    ◆ <math>2\text{--}4^{\circ}\text{C}</math>    ▲ <math>\geq 4^{\circ}\text{C}</math>

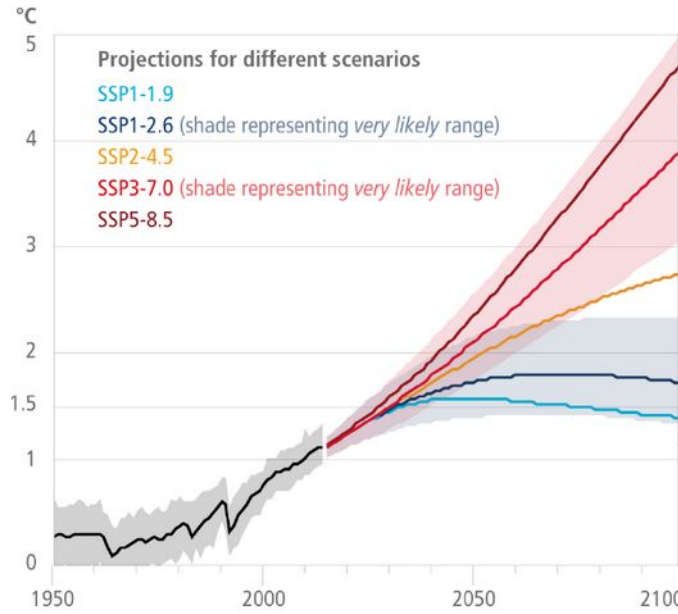


Progi przekroczenia punktów krytycznych systemu klimatycznego o znaczeniu globalnym i regionalnym. Zakresy prawdopodobieństwa przekroczenia (A) w kontekście projekcji IPCC dla scenariuszy rozwoju oraz obecnych polityk i celów (B) oraz liczba progów, które mogą zostać przekroczone (C).

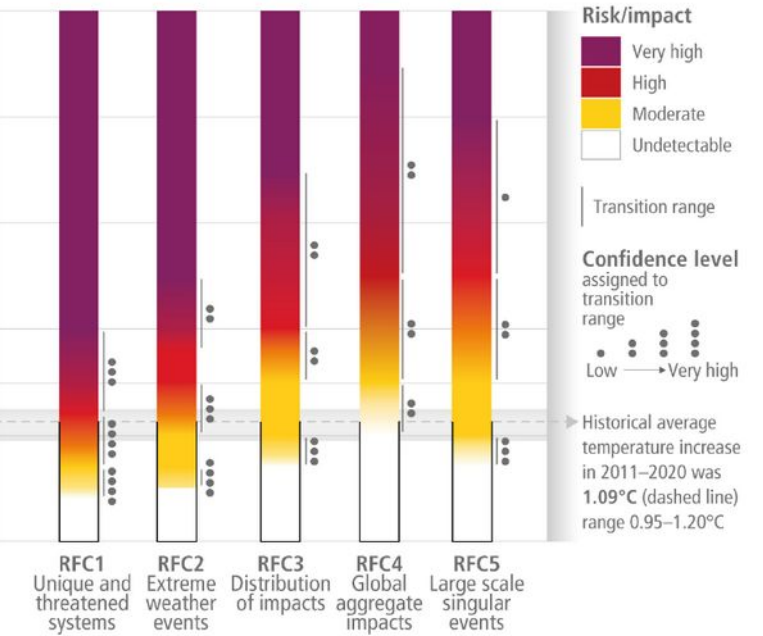
# IPCC 6AR WG2

## Global and regional risks for increasing levels of global warming

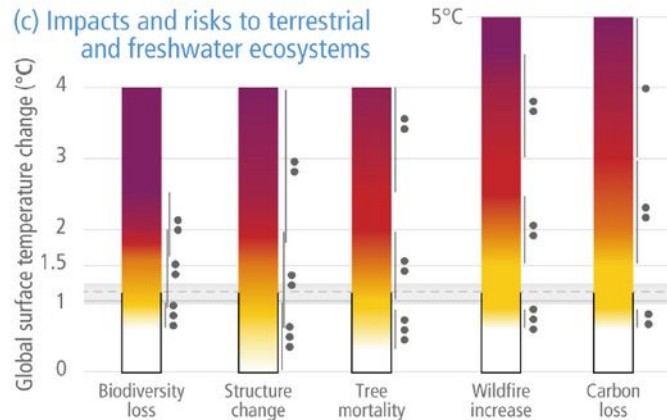
(a) Global surface temperature change  
Increase relative to the period 1850–1900



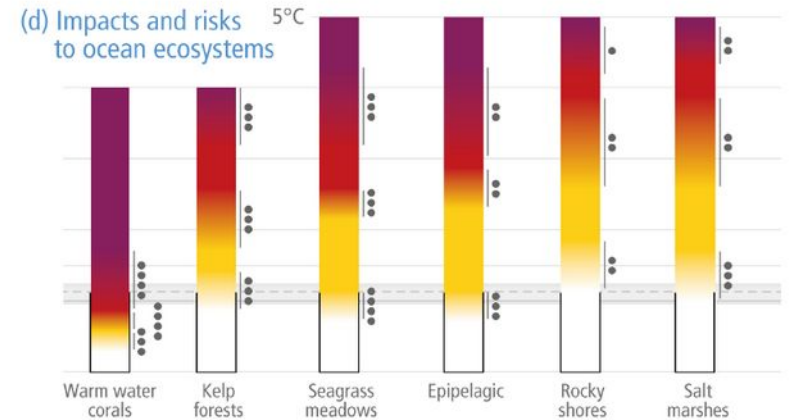
(b) Reasons for Concern (RFC)  
Impact and risk assessments assuming low to no adaptation



(c) Impacts and risks to terrestrial and freshwater ecosystems



(d) Impacts and risks to ocean ecosystems



<https://mailchi.mp/caa/large-cloud-feedback-confirms-high-climate-sensitivity>

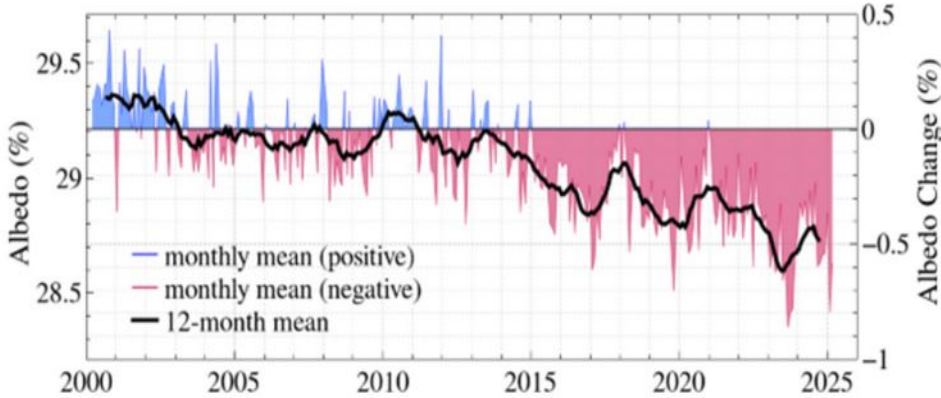


Fig. 1. Earth's albedo (reflectivity, in percent), seasonality removed[1],[2],[3],[4]

### Large Cloud Feedback Confirms High Climate Sensitivity

14 May 2025

James Hansen and Pushker Kharecha

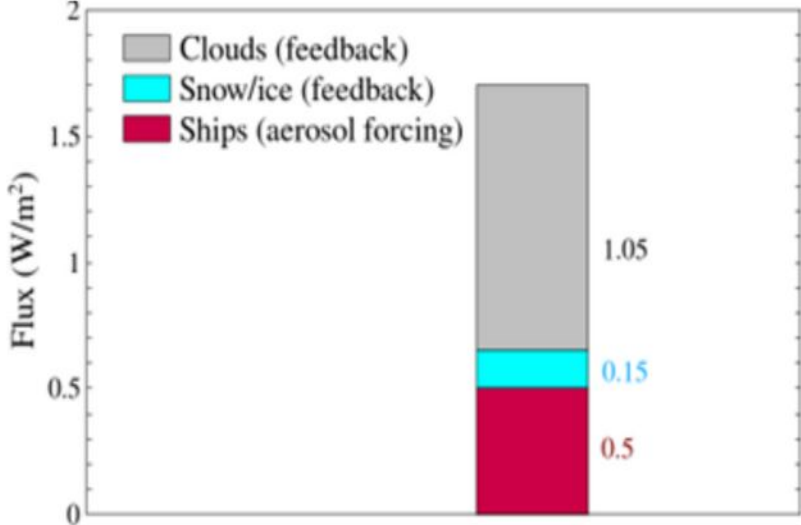
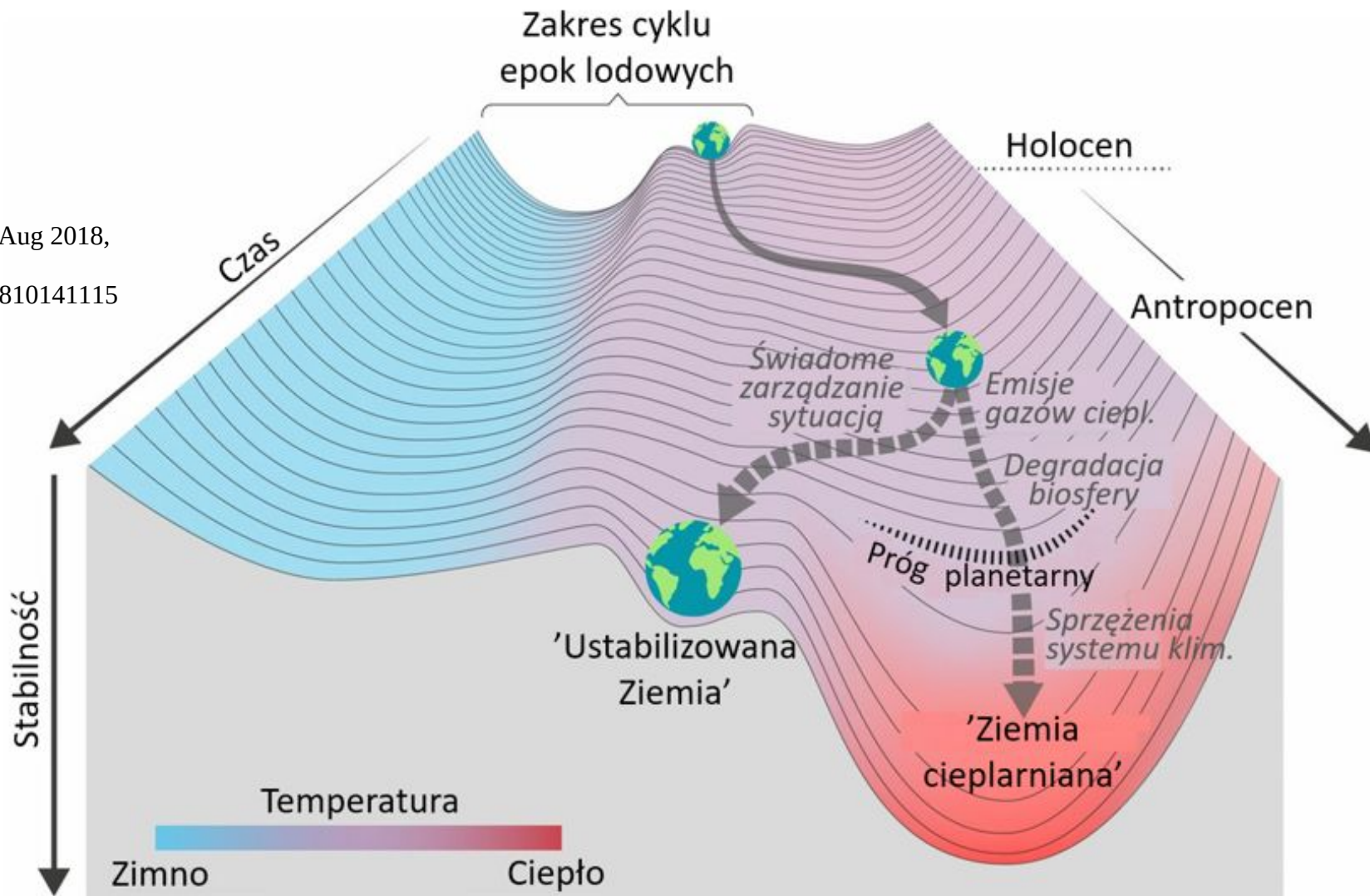


Fig. 2. Inferred contributions to reduced Earth albedo[5]

# Scenariusze na przyszłość

Steffen et al., PNAS Aug 2018,  
115 (33) 8252-8259;  
DOI: 10.1073/pnas.1810141115

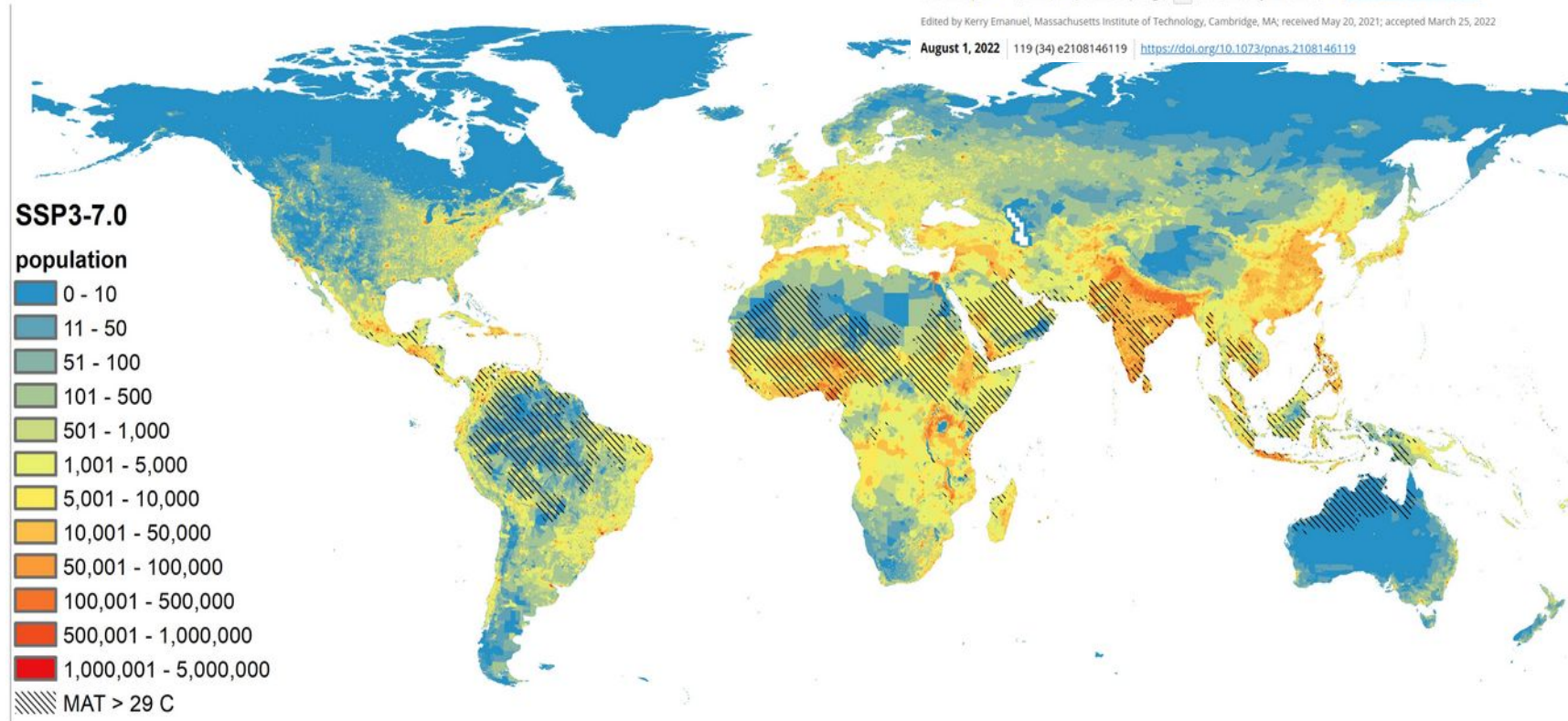


# Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios

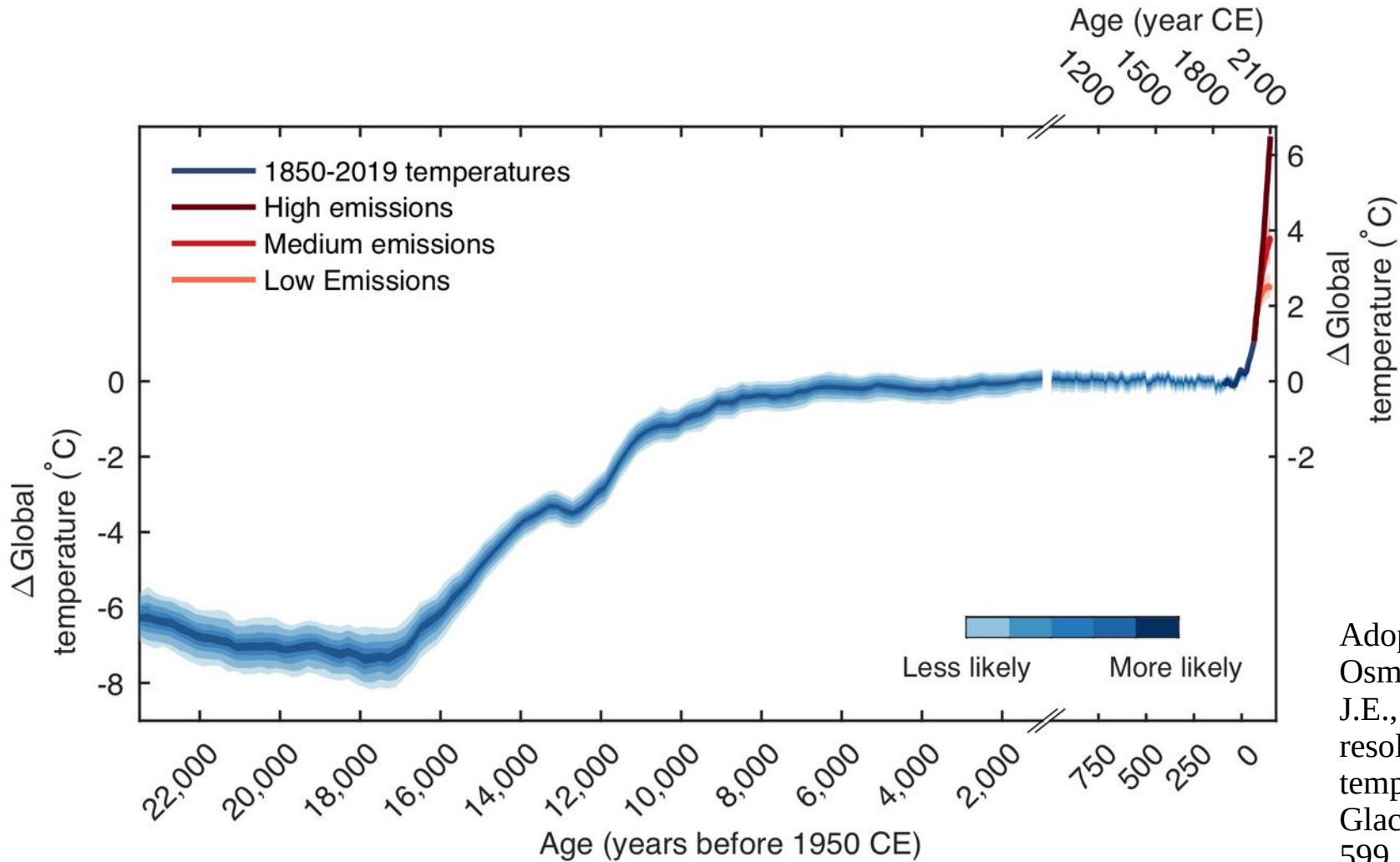
Luke Kemp, Chi Xu, Joanna Depledge, and Timothy M. Lenton [Authors Info & Affiliations](#)

Edited by Kerry Emanuel, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA; received May 20, 2021; accepted March 25, 2022

August 1, 2022 | 119 (34) e2108146119 | <https://doi.org/10.1073/pnas.2108146119>



Overlap between future population distribution and extreme heat. CMIP6 model data [from nine GCM models available from the WorldClim database] were used to calculate MAT under SSP3-7.0 during around 2070 (2060–2080) alongside Shared SSP3 demographic projections to ~2070. The shaded areas depict regions where MAT exceeds 29 °C, while the colored topography details the spread of population density.



Adopted after:  
 Osman, M.B., Tierney,  
 J.E., Zhu, J. et al. Globally  
 resolved surface  
 temperatures since the Last  
 Glacial Maximum. *Nature*  
 599, 239–244 (2021).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4>

# Porównanie zmian średniej temperatury globu i koncentracji CO<sub>2</sub> w atmosferze od czasów dinozaurów (65 milionów lat temu) do teraz z możliwym antropogenicznym globalnym ociepleniem (450 lat).

[https://websites.pmc.ucsc.edu/~jzachos/images/CENOGRID\\_Cartoon\\_withProjection\\_alternate.png](https://websites.pmc.ucsc.edu/~jzachos/images/CENOGRID_Cartoon_withProjection_alternate.png)

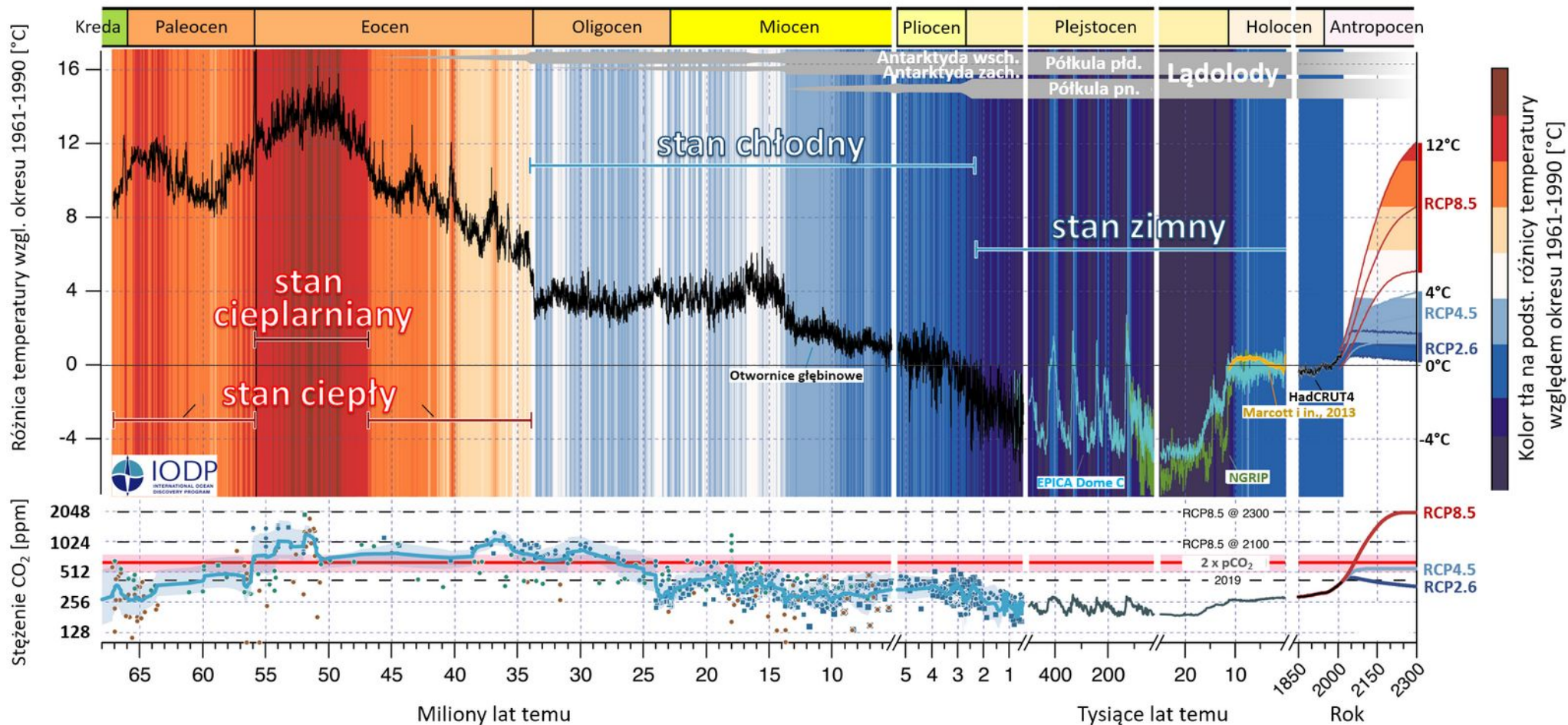


Figure ES.3 Global GHG emissions under different scenarios and the emissions gap in 2030 and 2035

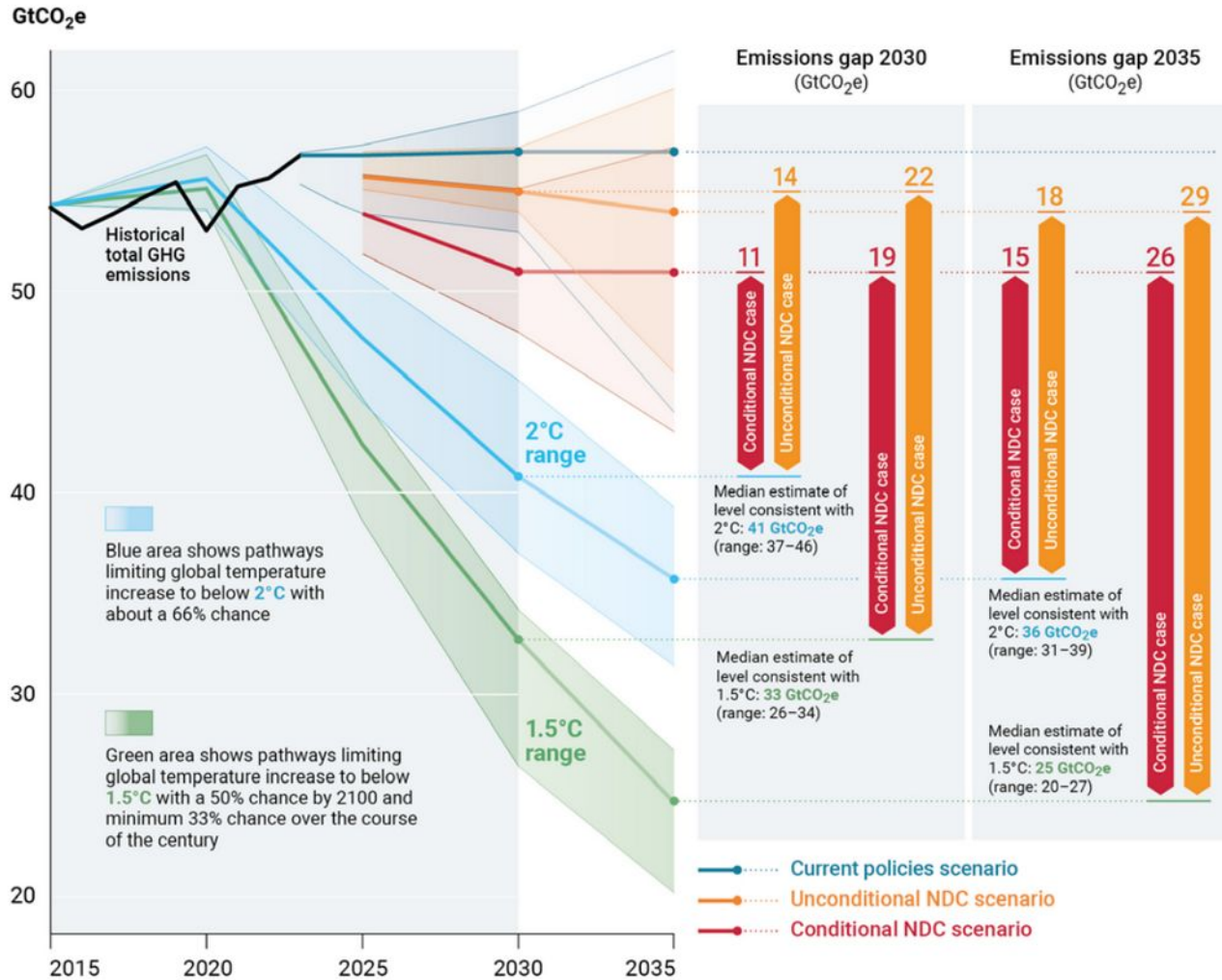
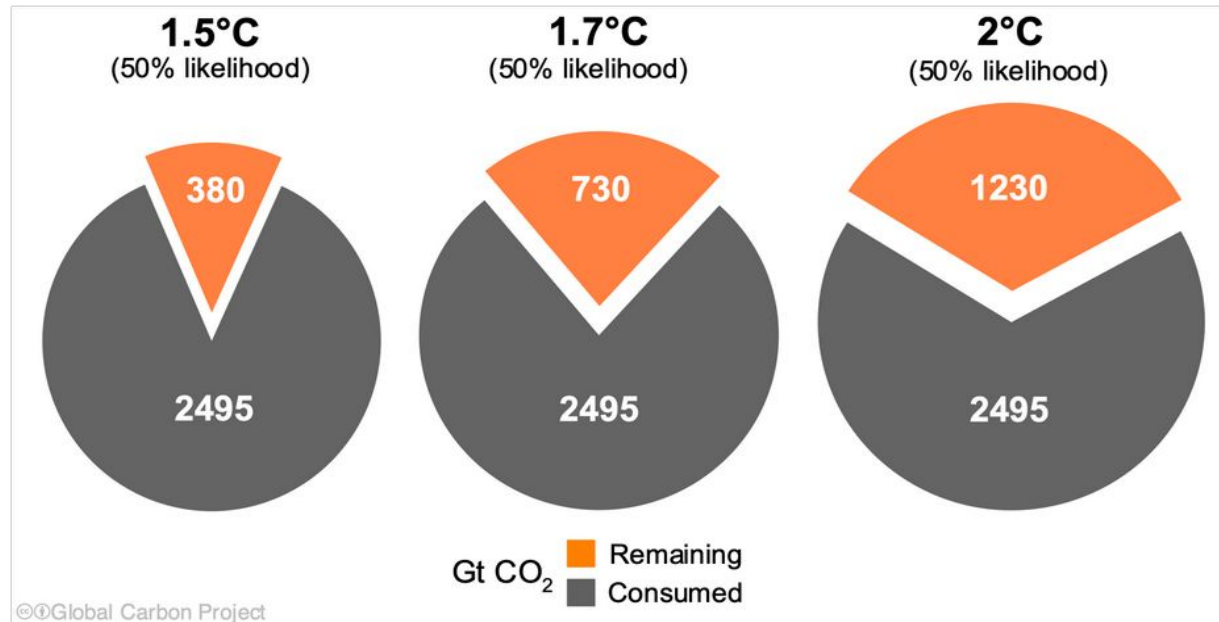


Table ES.2 Global total GHG emissions in 2030, 2035 and 2050, and estimated gaps under different scenarios

# Remaining carbon budget

The remaining carbon budget to limit global warming to 1.5°C , 1.7°C and 2°C is 380 GtCO<sub>2</sub>, 730 GtCO<sub>2</sub>, and 1230 GtCO<sub>2</sub> respectively, equivalent to 9, 18 and 30 years from 2023.

2610 GtCO<sub>2</sub> have been emitted since 1750



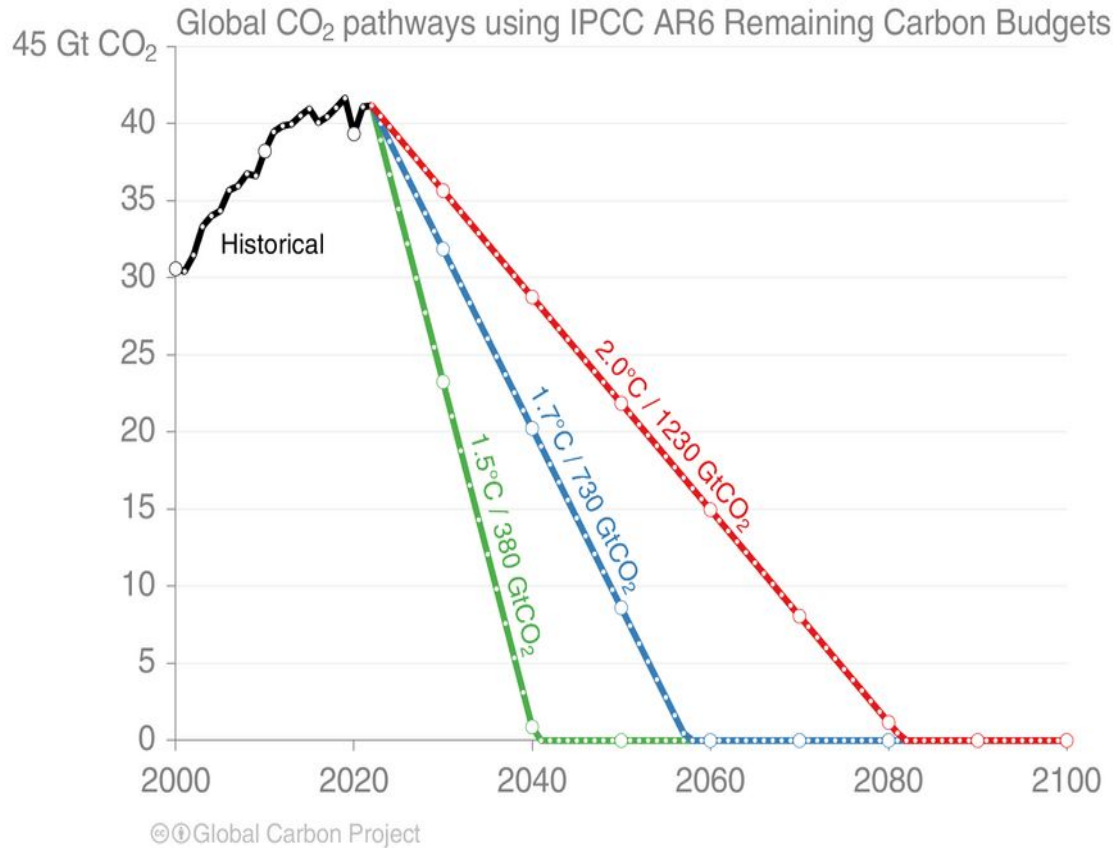
The remaining carbon budgets are updated from IPCC AR6 WG1 Chapter 5 by removing additional historical emissions since 1 January 2020.

Quantities are subject to additional uncertainties e.g., future mitigation choices of non-CO<sub>2</sub> emissions

Source: IPCC AR6 WG1; [Friedlingstein et al 2022](#); [Global Carbon Budget 2022](#)

# Remaining carbon budget

Global CO<sub>2</sub> emissions must reach zero to limit global warming



Source: [Friedlingstein et al 2022](#); [Global Carbon Project 2022](#)

## WNIOSKI:

Aktualne sprzężenia między systemem ludzkim (kulturą i gospodarką) a systemem ziemskim (naturą) nie są wystarczające dla utrzymania kryzysu klimatycznego i kryzysu bioróżnorodności pod kontrolą.

Utrzymanie systemu ludzkiego w aktualnej postaci w dłuższym czasie jest niemożliwe, można wyróżnić dwa skrajne scenariusze na przyszłość:

1) pożądany – kontrolowana ale szybka zmiana systemu ludzkiego prowadząca do uwzględnienia wzajemnych zależności z systemem natury;

2) katastrofalny – dekompozycja systemu ludzkiego wskutek nieuwzględnienia uwarunkowań jakie wynikają z praw natury i ograniczeń planetarnych.

Independent report

## Final Report - The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review

Final Report of the Independent Review on the Economics of Biodiversity led by Professor Sir Partha Dasgupta.

From: [HM Treasury](#)  
 Published: 2 February 2021  
 Last updated: 18 February 2021, [see all updates](#)

### Documents



#### [The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review - Full Report](#)

PDF, 26.8MB, 610 pages



#### [The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review - Abridged Version](#)

PDF, 8.43MB, 103 pages



#### [The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review - Headline Messages](#)

PDF, 1.84MB, 10 pages

### Related content

Collection

[The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review](#)

### Brexit

Check  Change  Go

[Check what you need to do](#)

Our economies, livelihoods and well-being all depend on our most precious asset: Nature.

We have collectively failed to engage with Nature sustainably, to the extent that our demands far exceed its capacity to supply us with the goods and services we all rely on.

Our unsustainable engagement with Nature is endangering the prosperity of current and future generations.

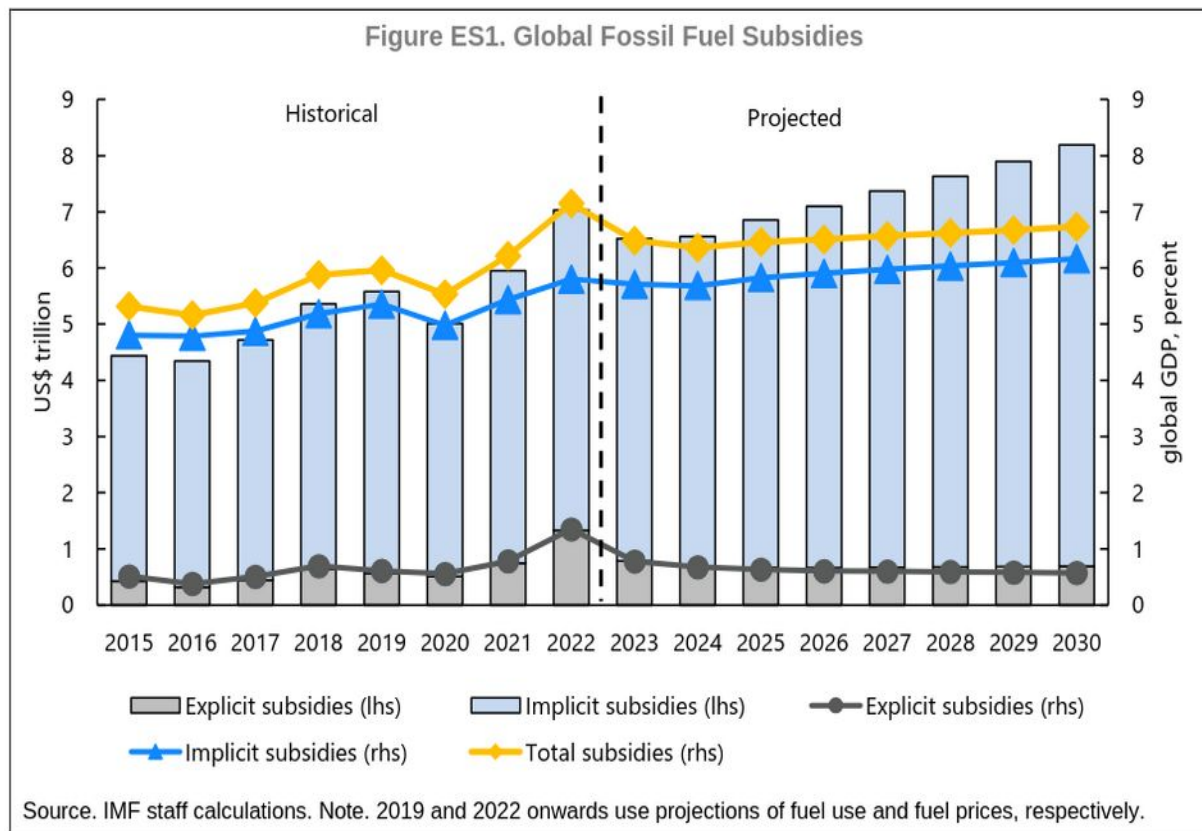
At the heart of the problem lies deep-rooted, widespread institutional failure.

The solution starts with understanding and accepting a simple truth: our economies are embedded within Nature, not external to it.

We need to change how we think, act and measure success.

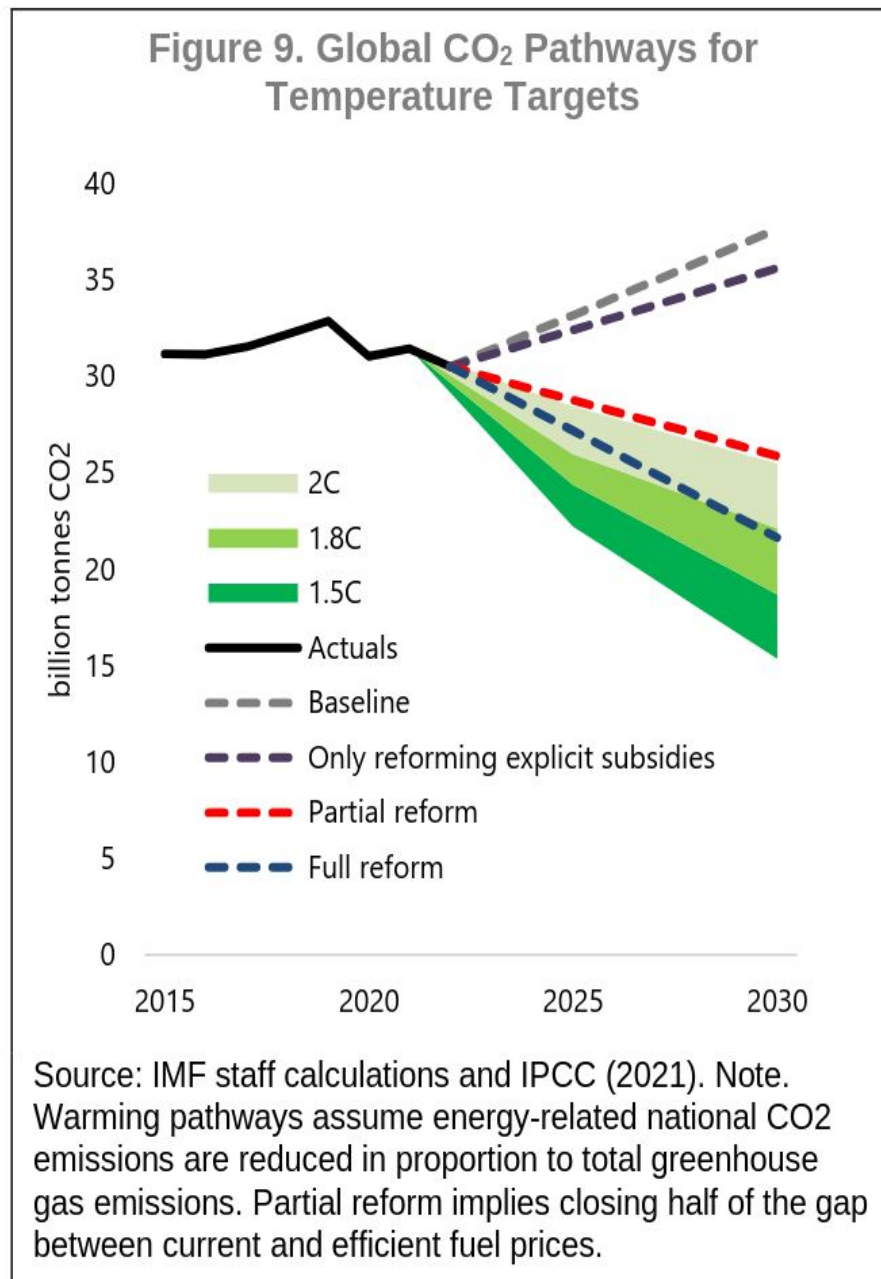
W skali globalnej subsydia do paliw kopalnych wyniosły 5,9 biliona dolarów, czyli 6,8 procent PKB w 2020 roku.

Zaledwie 8 procent dopłat w 2020 roku odzwierciedla zaniżone obciążenia z tytułu kosztów dostaw (dopłaty jawne), a 92 procent - zaniżone obciążenia z tytułu kosztów środowiskowych i utraconych podatków konsumpcyjnych (dopłaty ukryte).



Pełna reforma cen paliw zmniejsza prognozowaną globalną emisję CO<sub>2</sub> z paliw kopalnych o 34 procent poniżej emisji w 2019 r. (wykres 9).

Globalnie około 55 procent redukcji emisji CO<sub>2</sub> wynikałoby ze zmniejszonego zużycia węgla, natomiast 31 i 12 procent wynikałoby odpowiednio ze zmniejszenia zużycia ropy naftowej i gazu ziemnego.



# There is a rapidly narrowing window of opportunity to enable climate resilient development

Multiple interacting choices and actions can shift development pathways towards sustainability

