

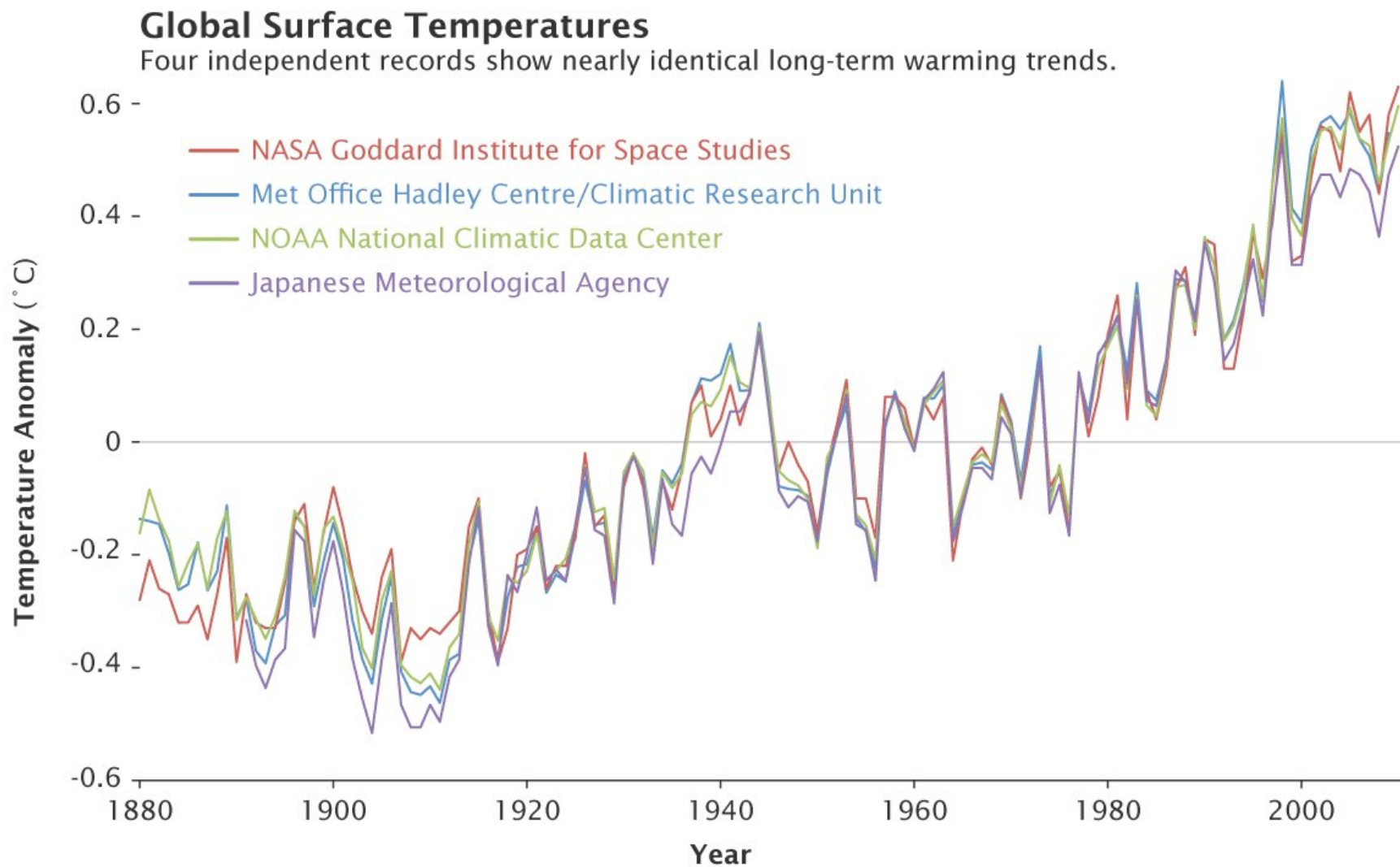
Globalne ocieplenie okiem fizyka

Szymon Malinowski
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

21 listopada 2019

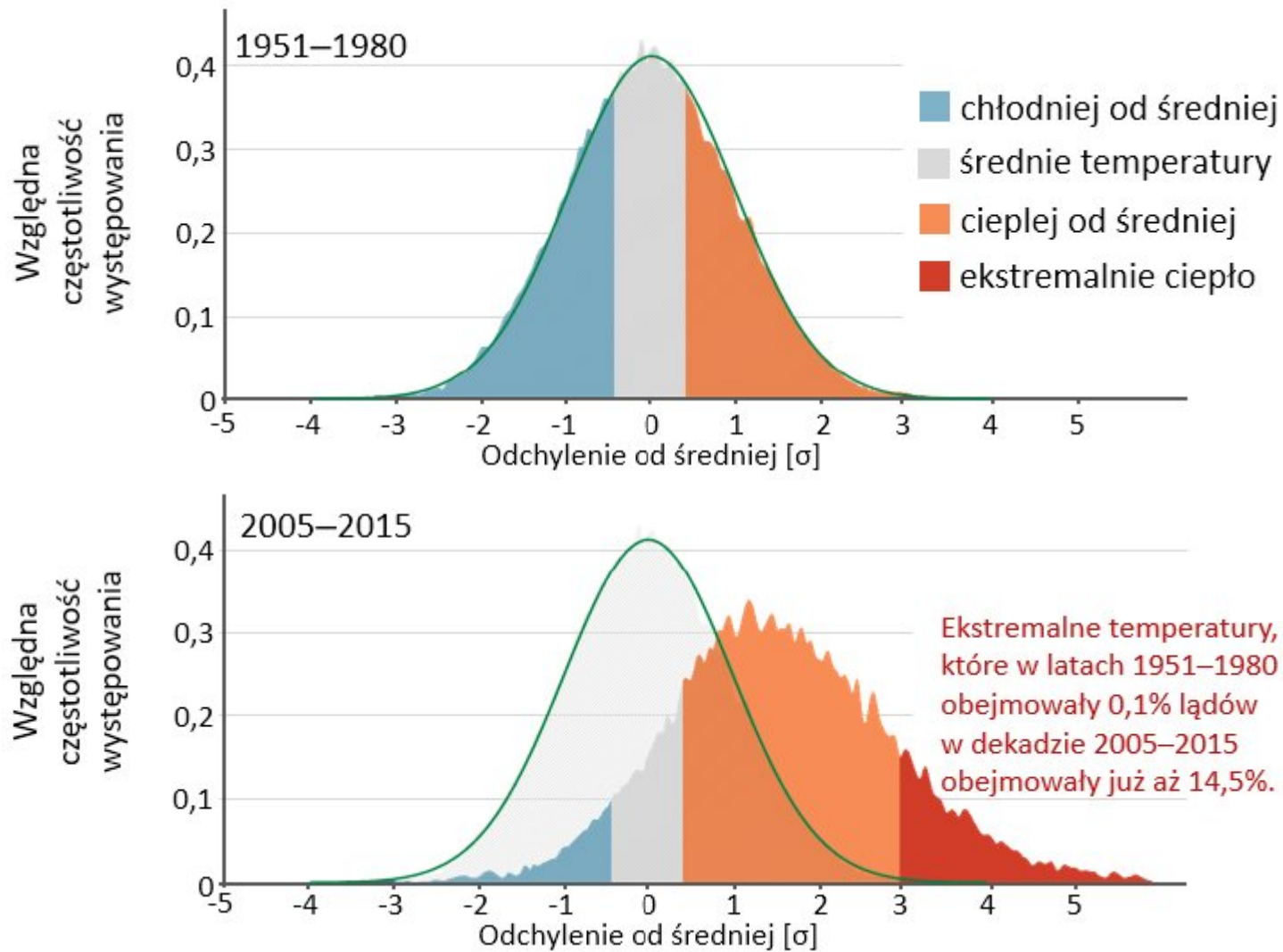


Globalne ocieplenie – obserwowane od połowy XX wieku podwyższenie średniej temperatury atmosfery przy powierzchni ziemi i oceanów oraz przewidywane ocieplenie w przyszłości.

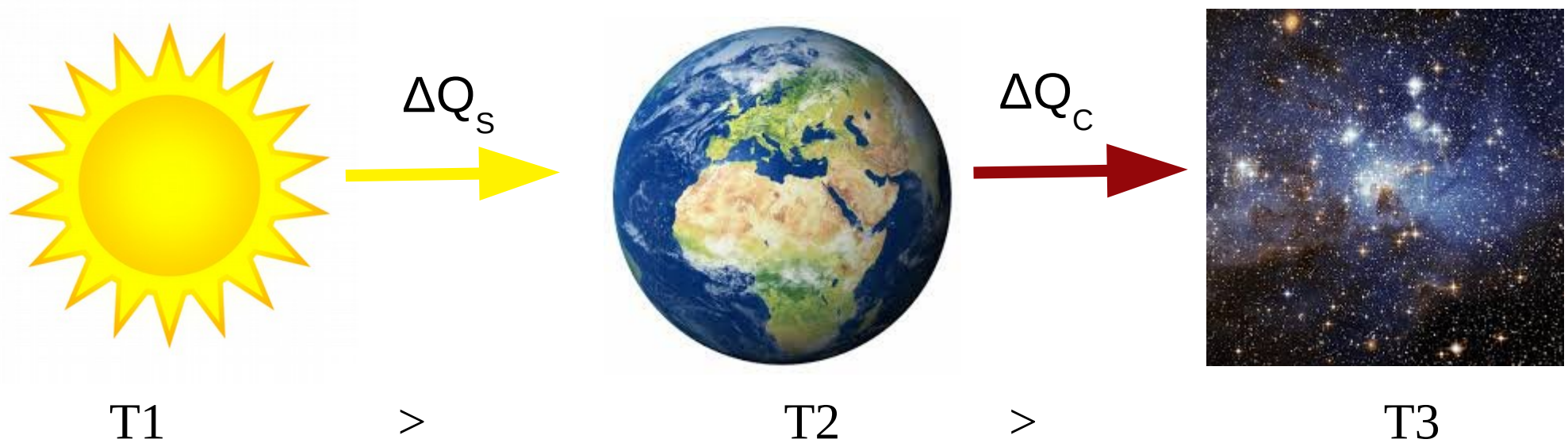


Credit: NASA Earth Observatory/Robert Simmon

Data Sources: NASA Goddard Institute for Space Studies, NOAA National Climatic Data Center, Met Office Hadley Centre/Climatic Research Unit, and the Japanese Meteorological Agency.



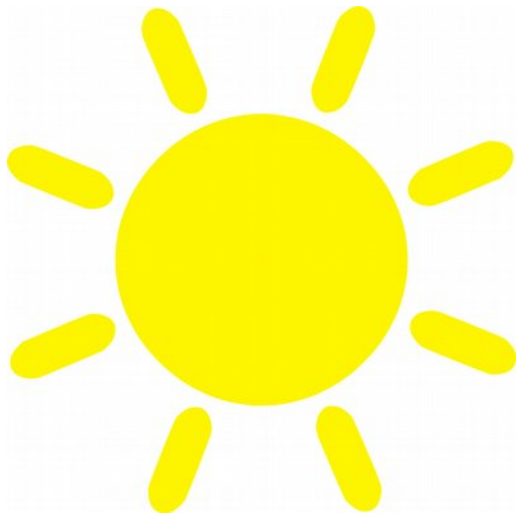
Częstotliwość występowania lokalnych odchyleń temperatury latem na lądach półkuli północnej względem okresu bazowego 1951–1980 .



Aby temperatura Ziemi była stała
strumień ciepła otrzymywanego przez Ziemię od Słońca ΔQ_s ($/\Delta t$)
musi być równoważony
strumieniem ciepła oddawanym przez Ziemię w kosmos ΔQ_c ($/\Delta t$).

Temperatura Ziemi rośnie, gdy $\Delta Q_s > \Delta Q_c$

Temperatura Ziemi spada, gdy $\Delta Q_s < \Delta Q_c$



$\sim 340 \text{ W/m}^2$ (160 W/m^2)



$\sim 0.1 \text{ W/m}^2$



$\sim 0.025 \text{ W/m}^2$

Stan równowagi: Temperatura Efektywna Ziemi

R- promień,

S- stała słoneczna,

A- albedo,

E_S - energia absorbowana:

$$E_S = (1-A)S\pi R^2.$$

Założenie: ciało doskonale czarne.

T_E - temperatura emisyjna

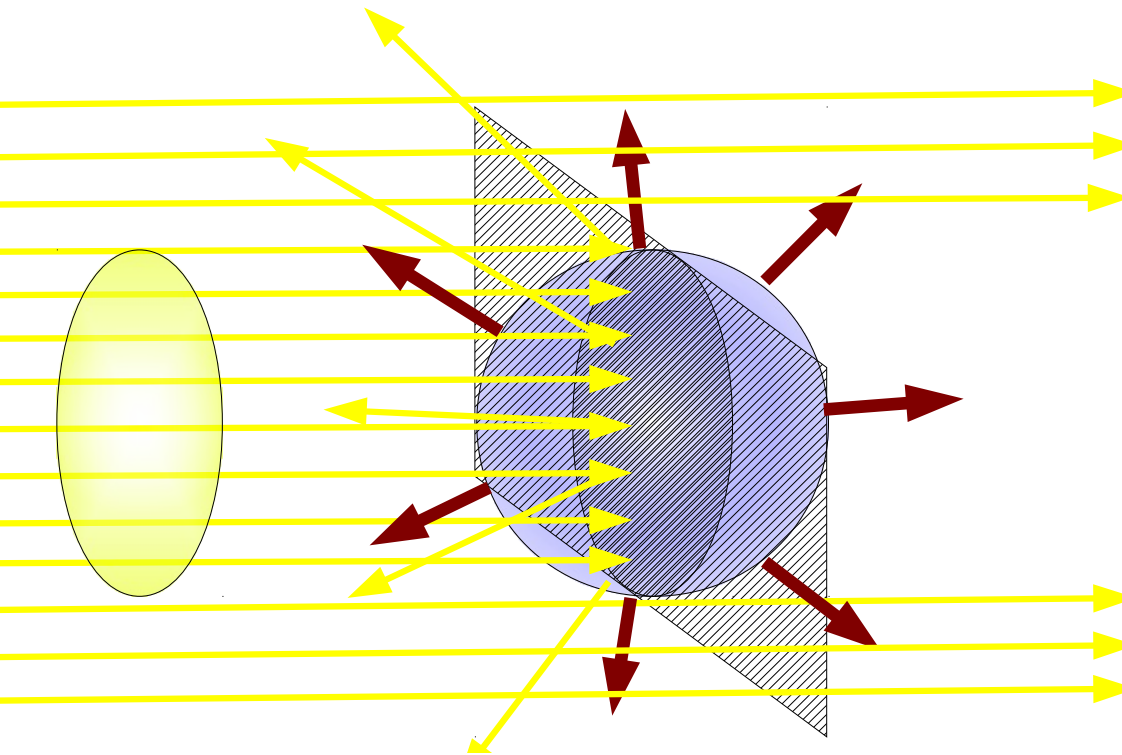
E_P - emisja energii w podczerwieni:

$$E_P = 4\pi R^2\sigma T_E^4.$$

Założenie równowagi $E_S = E_P$

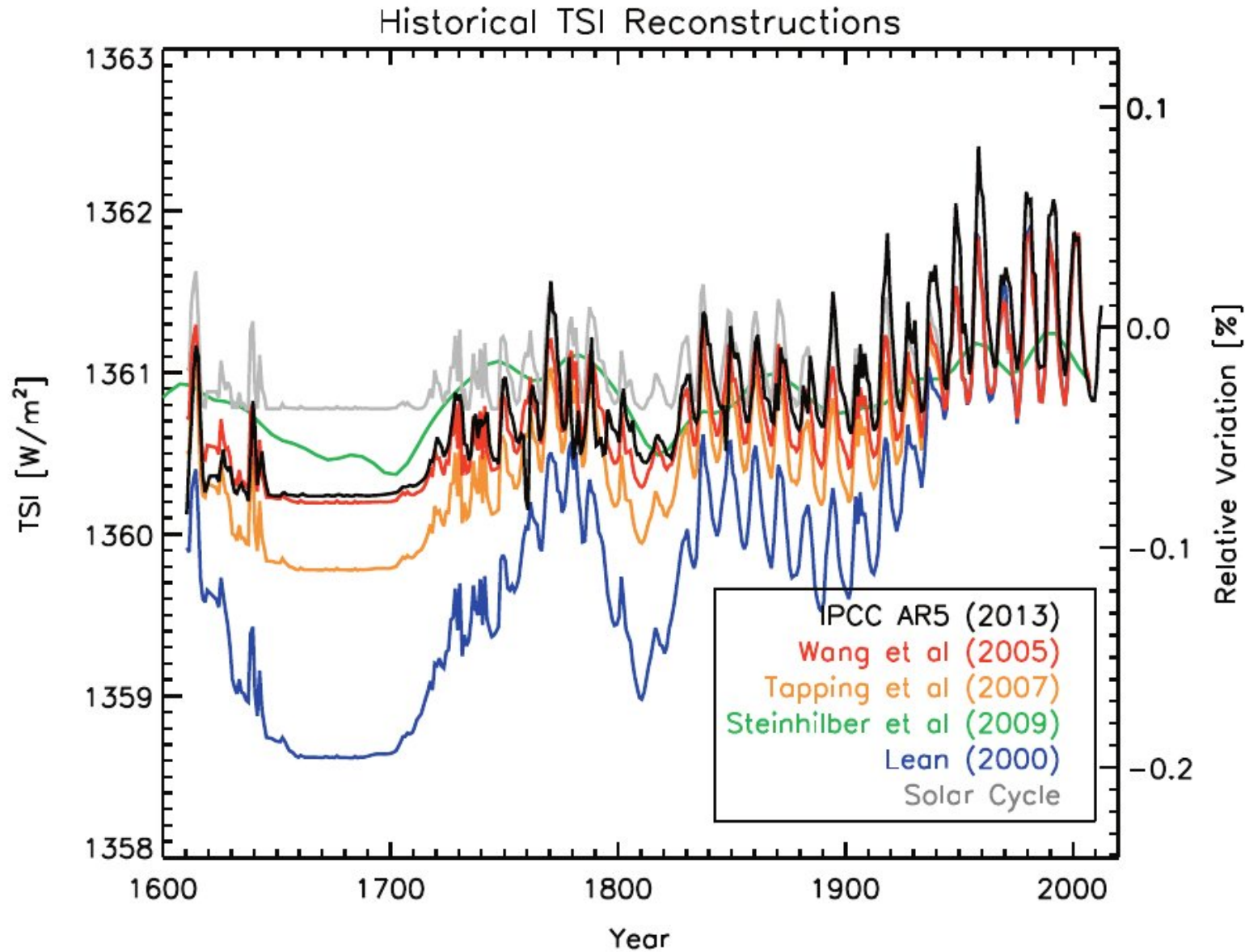
$$(1-A)S/4 = \sigma T_E^4.$$

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{(1-A)S}{4\sigma}}$$



To, dla $S=1362 \text{ W/m}^2$ i $A=0.3$ daje $T_E=254.81\text{K}$

Zmiany aktywności Słońca: Temperatura Efektywna Ziemi



$$T_E = 4 \sqrt{\frac{(1-A)S}{4\sigma}}$$

Dla zmiennego $S=1362\pm 1 \text{ W}/\text{m}^2$ i $A=0.3$ mamy $T_E=254.81\pm 0.05\text{K}$







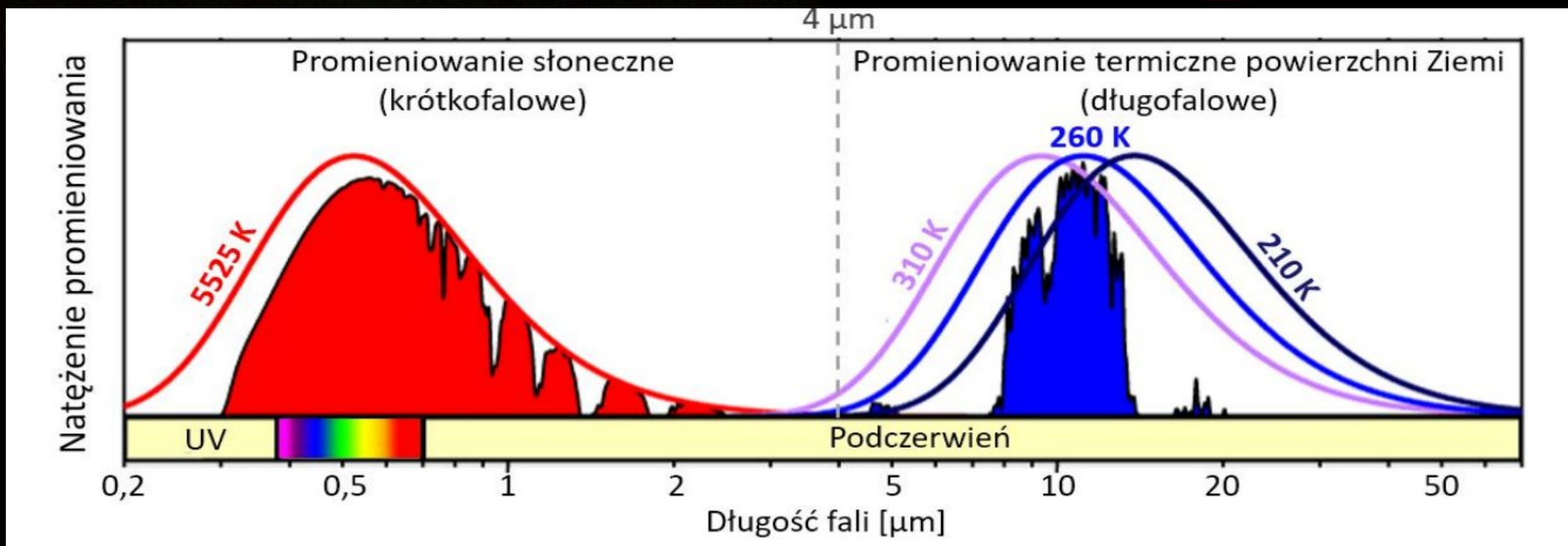
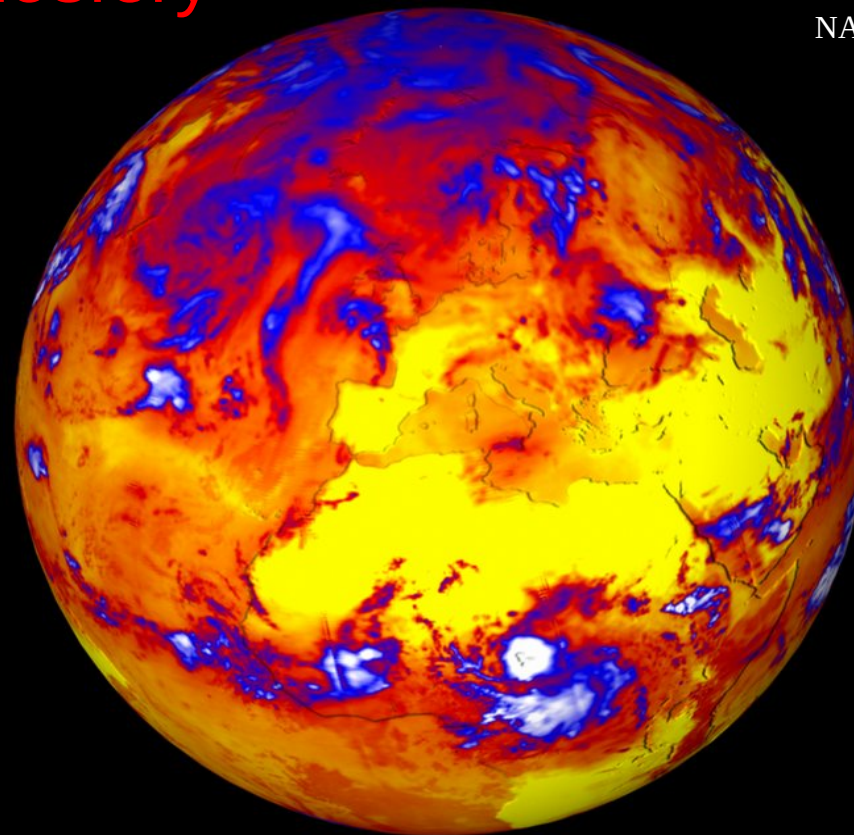
atmosfera



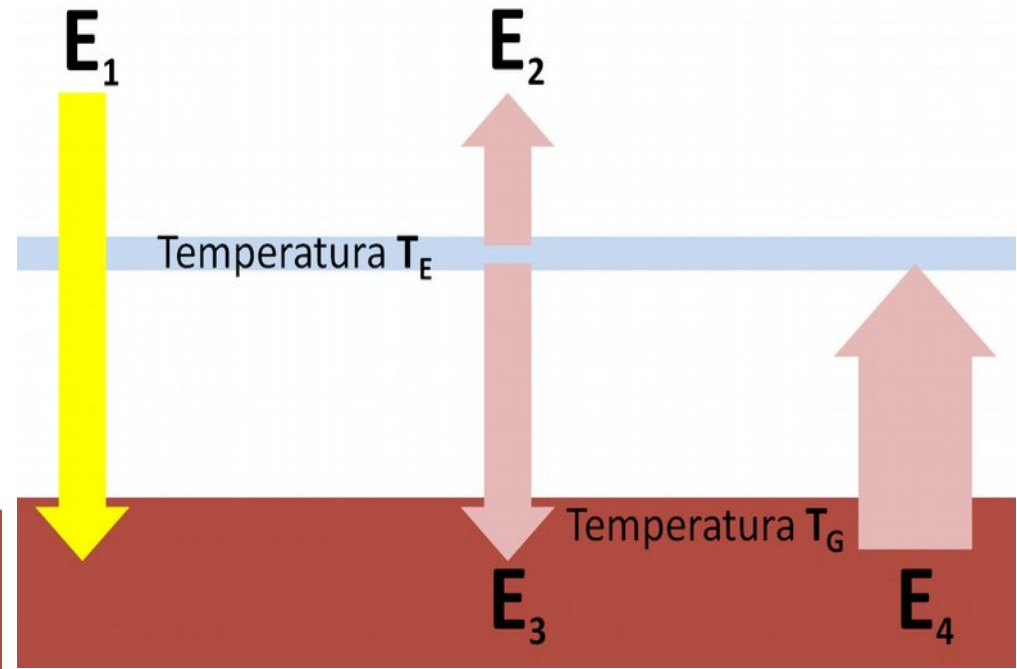
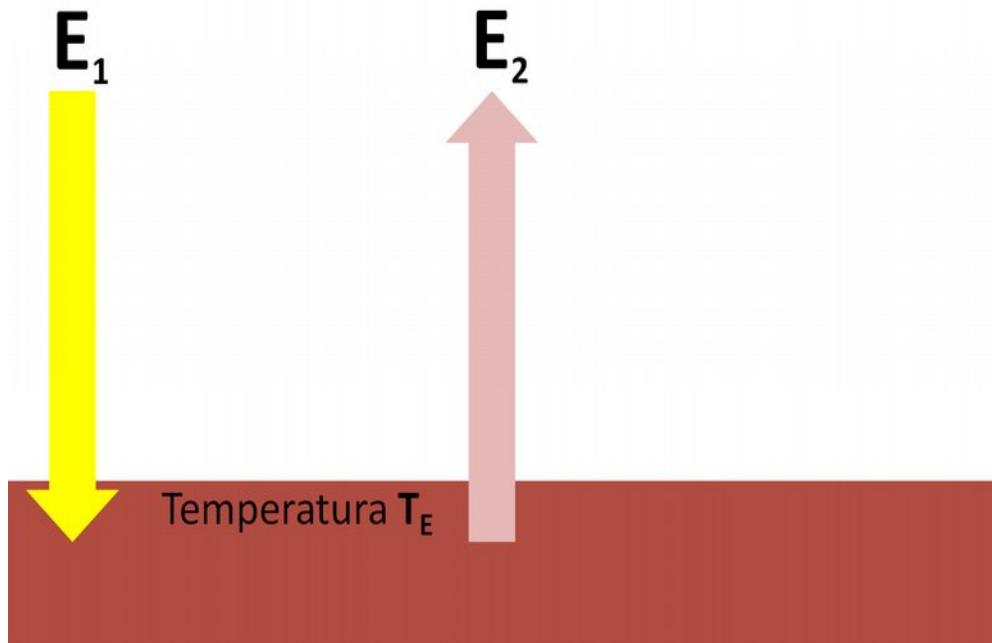
10m wody

Transmisja atmosfery

NASA



Efekt cieplarniany –konceptualnie

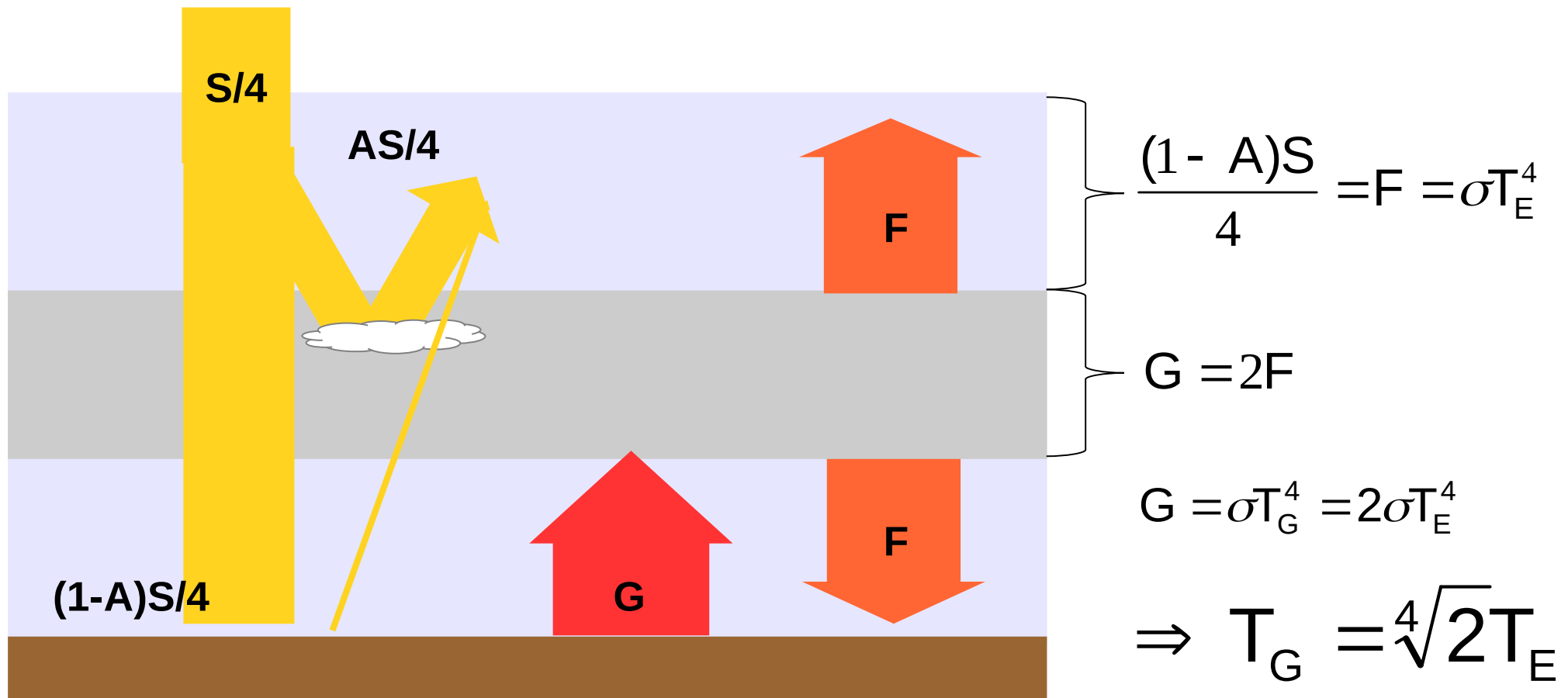


$$E_1 = E_2$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

$$E_4 = E_1 + E_3$$

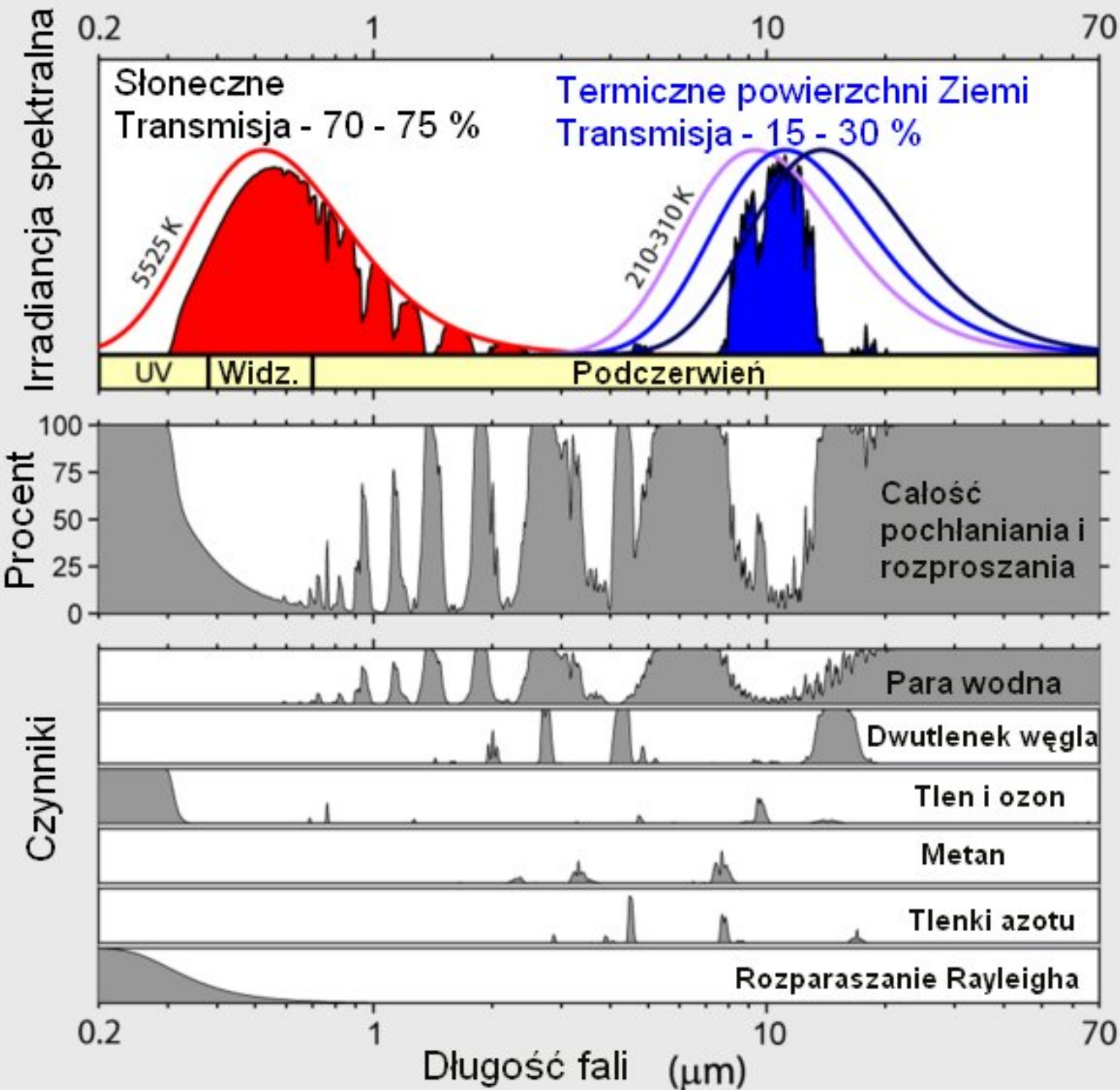
Efekt cieplarniany – model jednej szyby



$$T_E \approx 255\text{K}$$

$$T_G \approx 303\text{K}$$

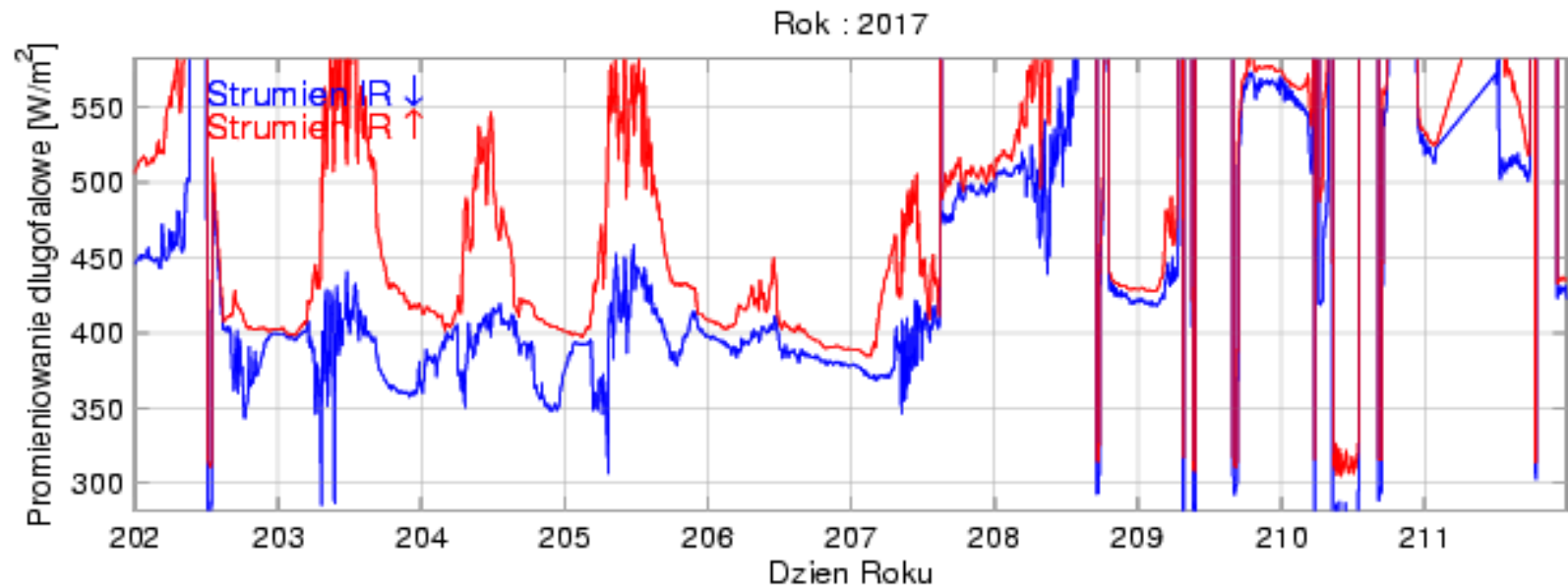
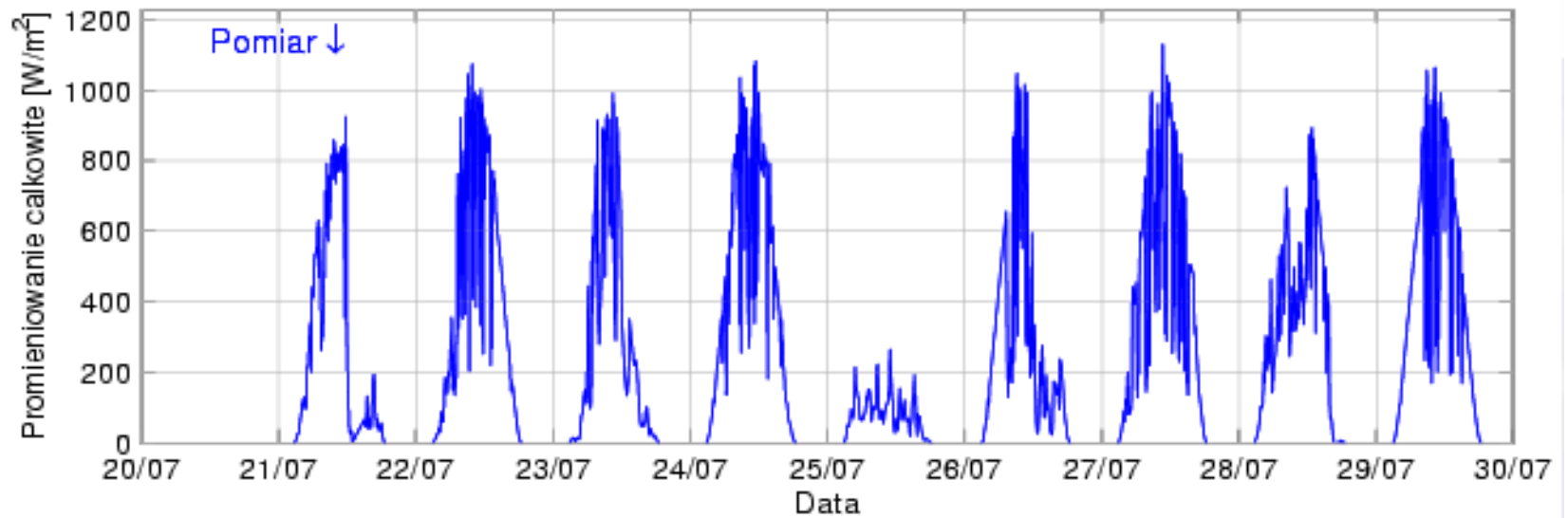
Promieniowanie przechodzące przez atmosferę



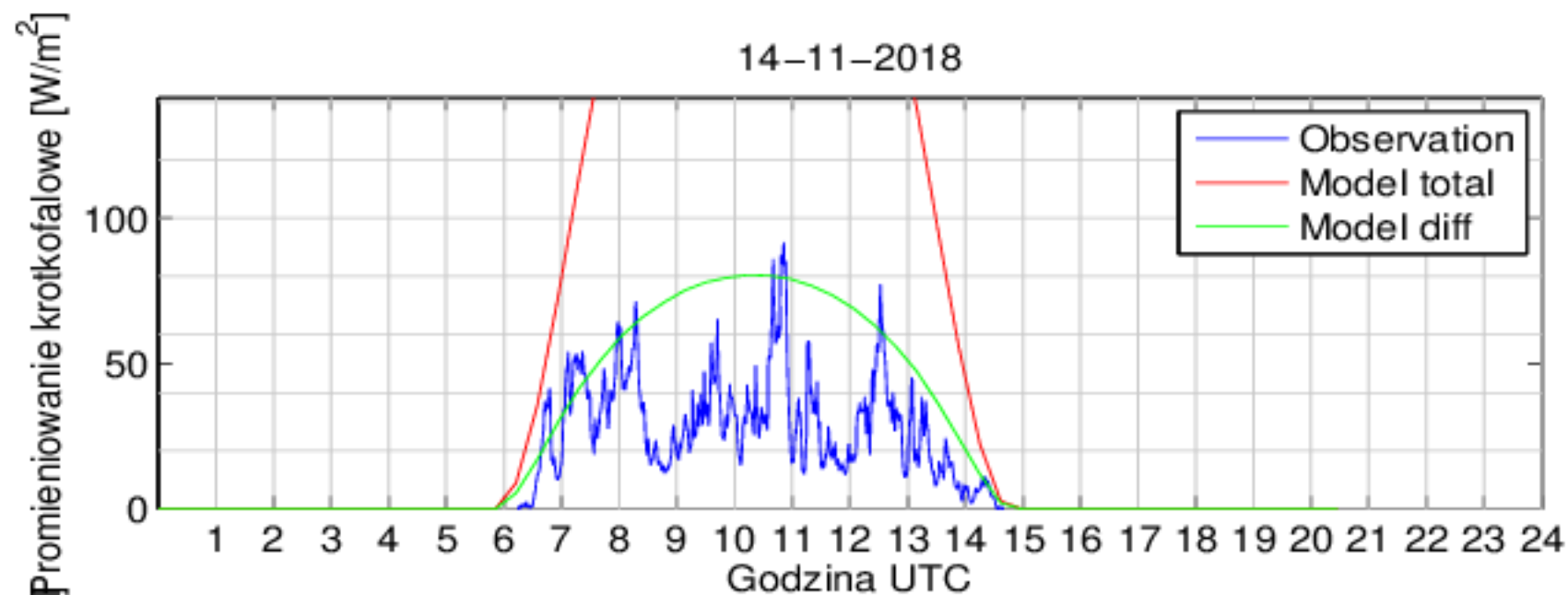
John Tyndall (~1850) doświadczalnie pokazał: H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 i wiele innych par i gazów to gazy cieplarniane.

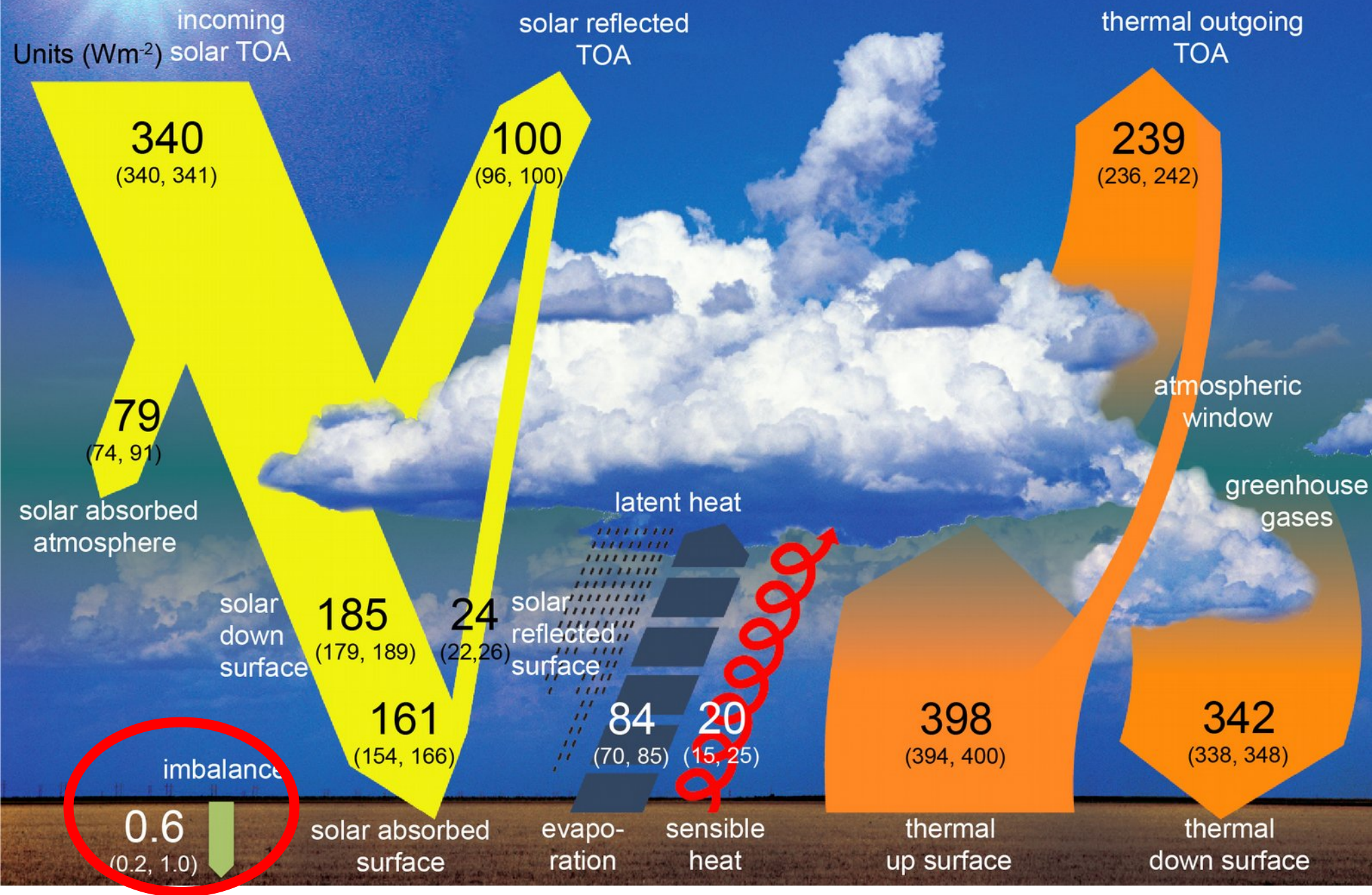
Uwaga: gazami cieplarnianymi są gazy o cząsteczkach trój- i więcej atomowych raz dwuatomowych o różnych atomach.

Strumienie promieniowania mierzone w Warszawie



Strumienie promieniowania mierzone w Warszawie





Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w W/m^2 .
 W nawiasach zakres niepewności i zmienności. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

Gdzie Ziemia lokuje nadwyżkę energii

1%

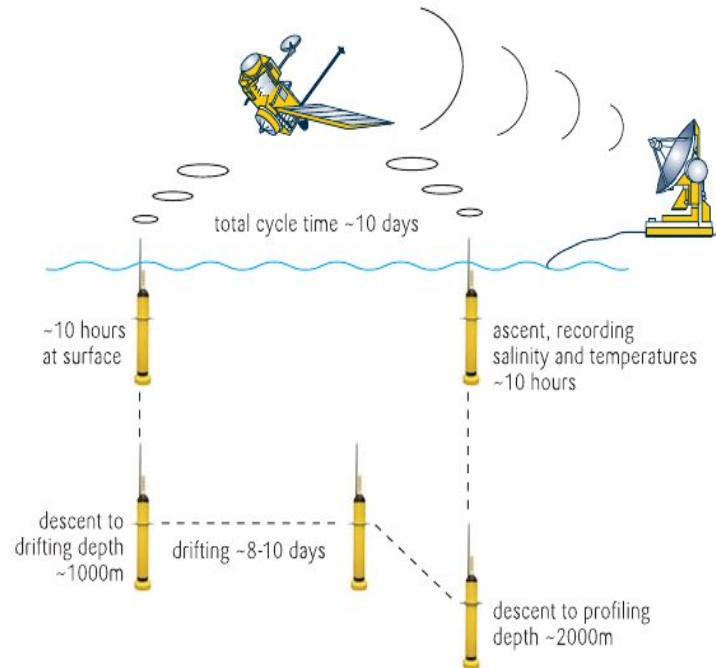
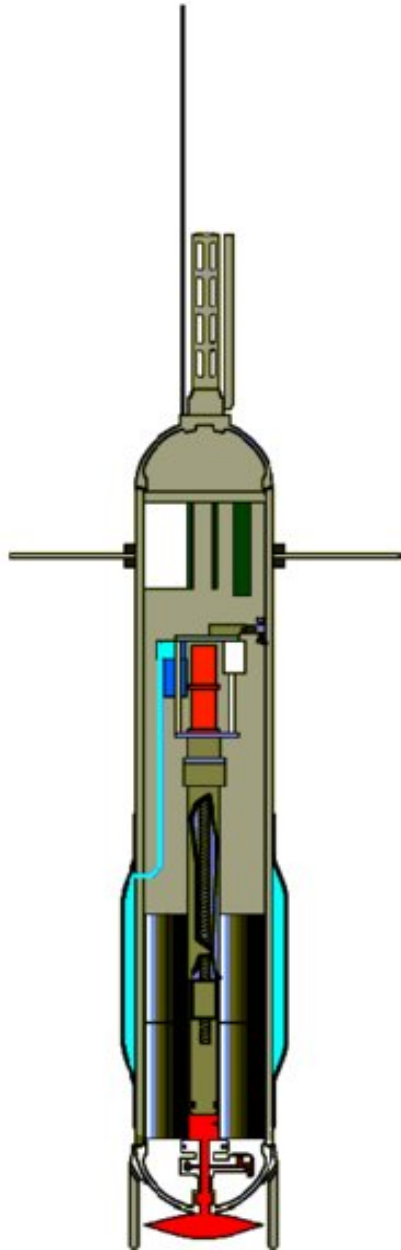
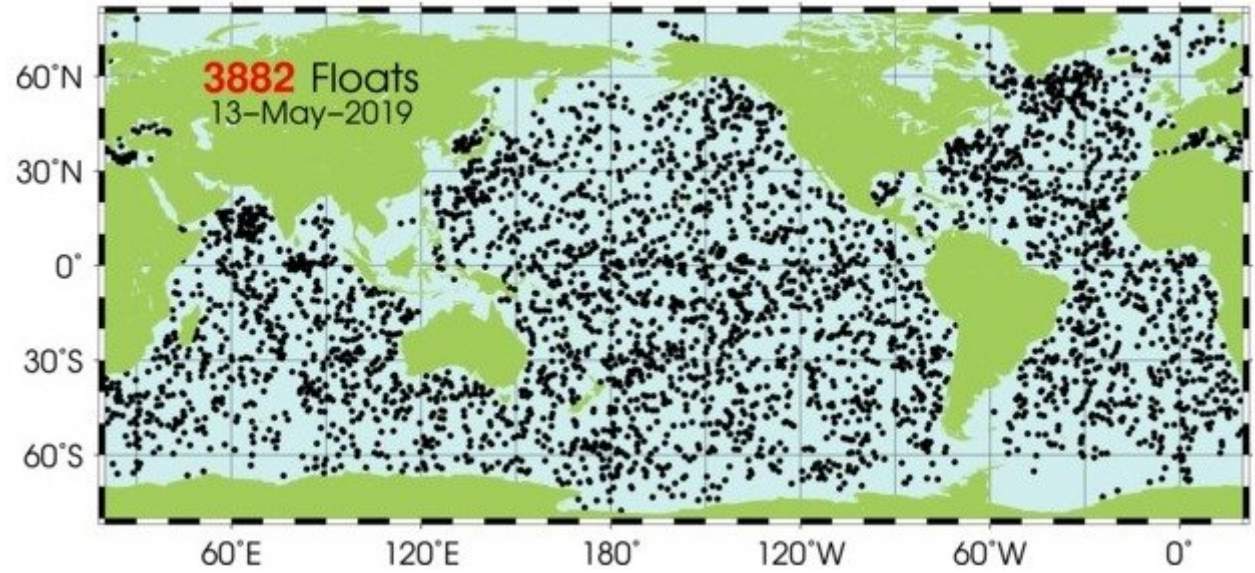
3%

3%

93%

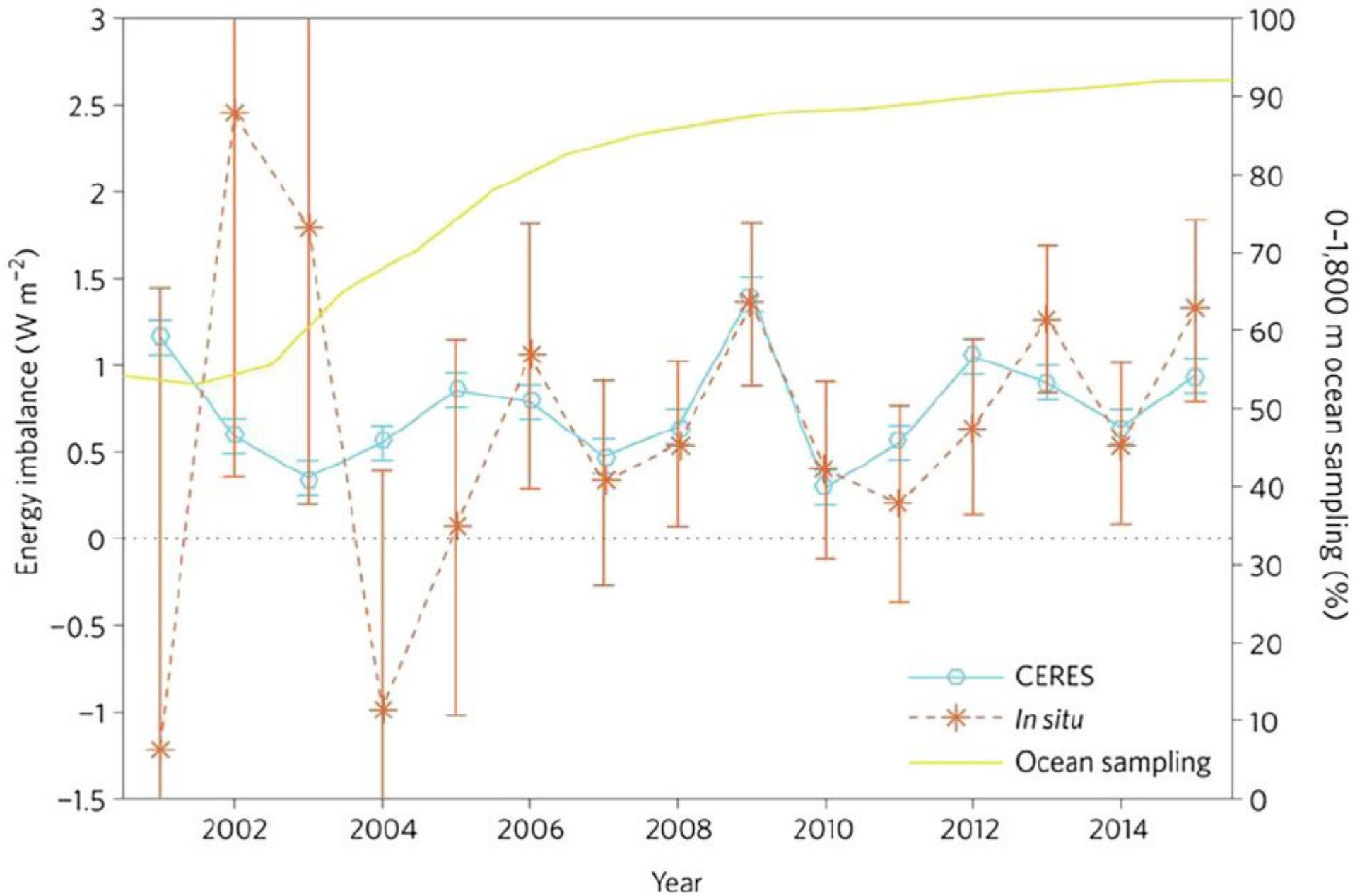


Projekt ARGO: profilowanie oceanów (temperatura, zasolenie, prądy).

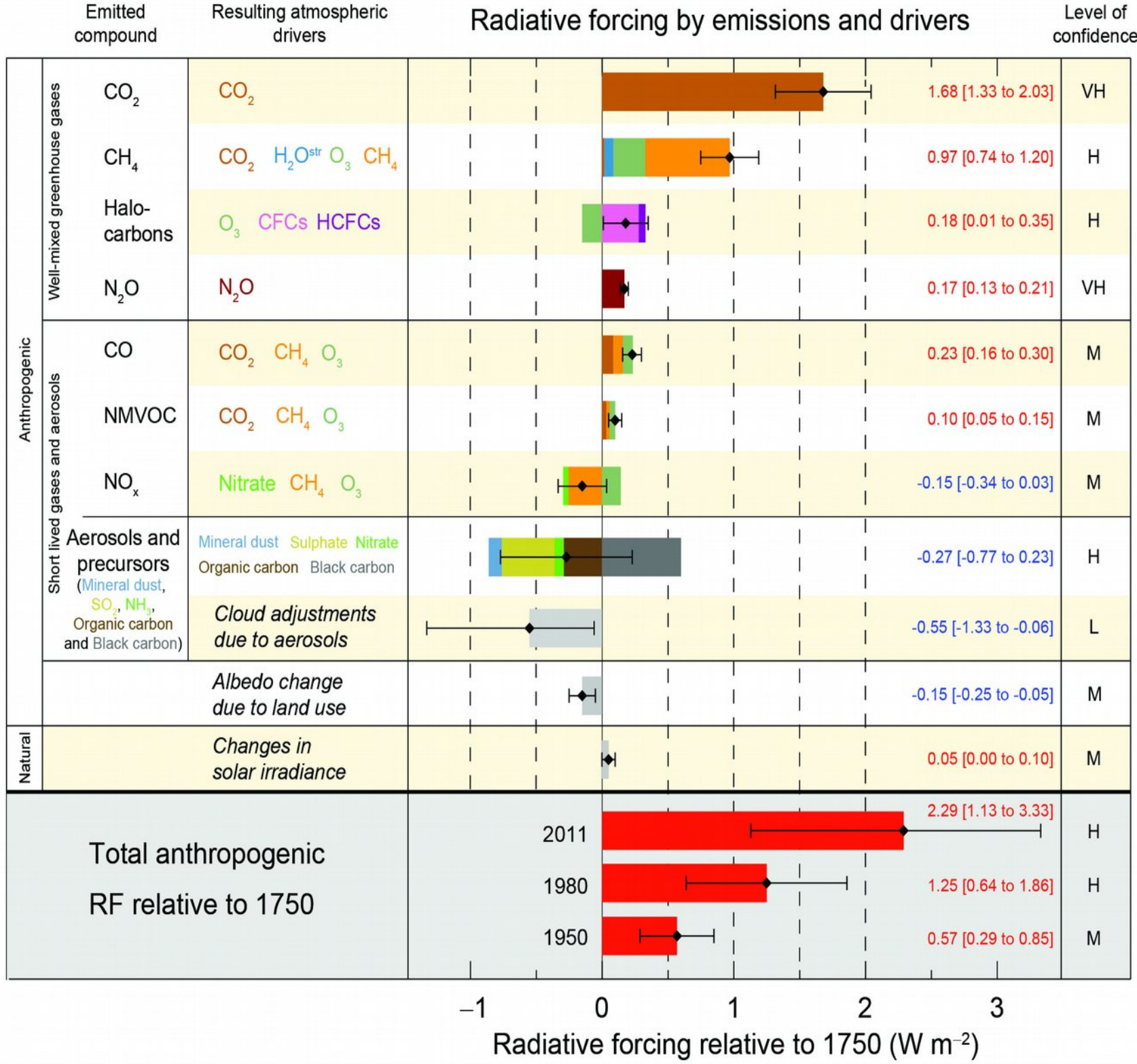


dane dostępne on-line

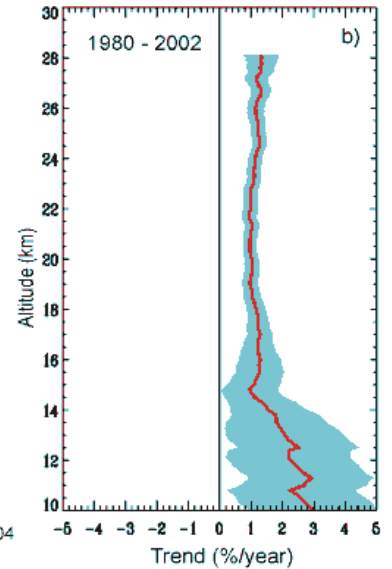
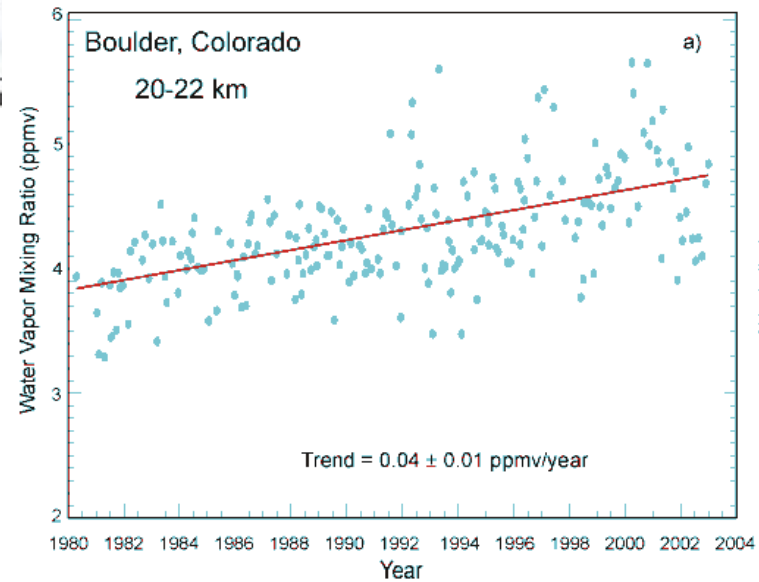
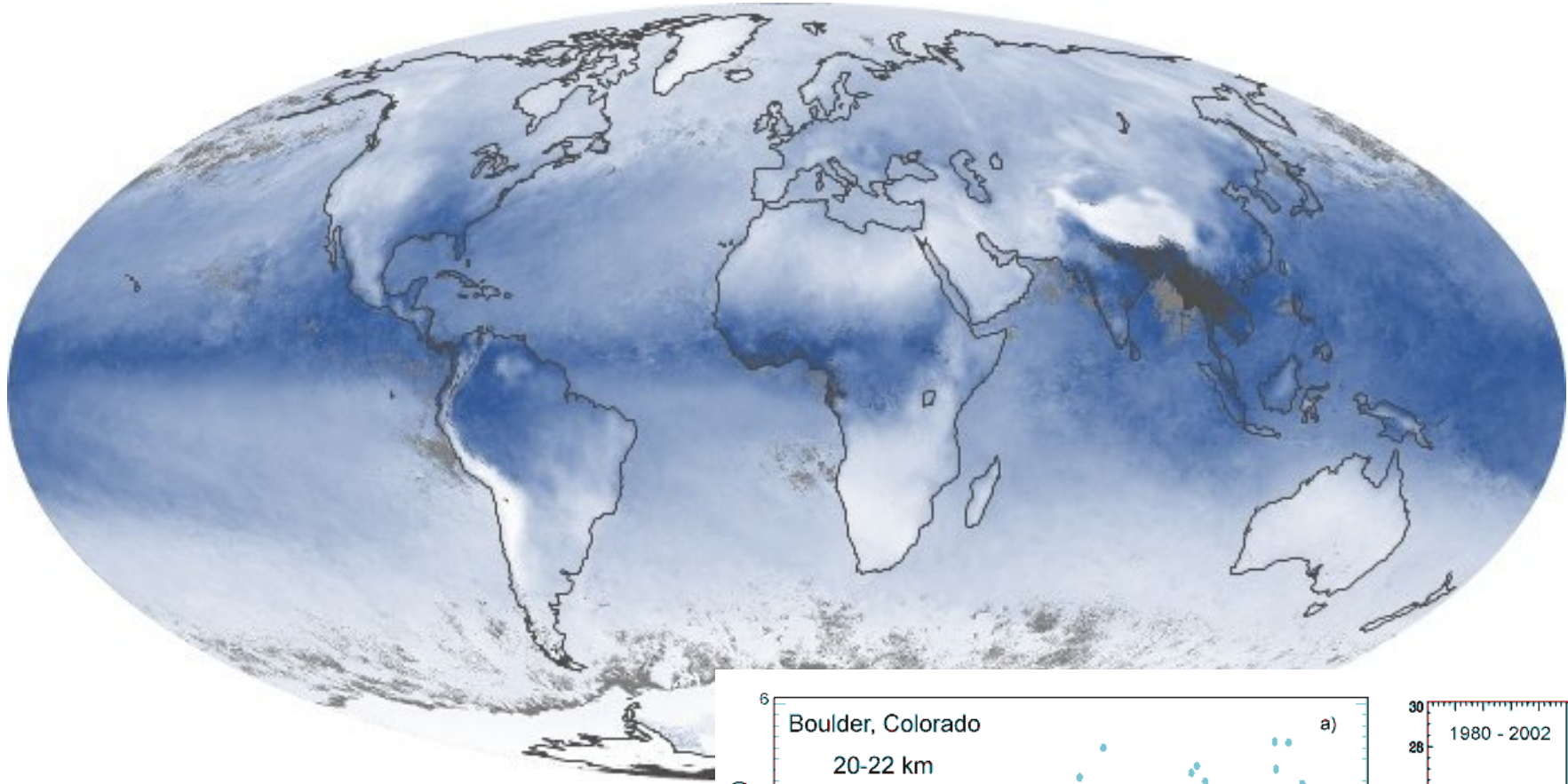
<http://www.argo.ucsd.edu/>

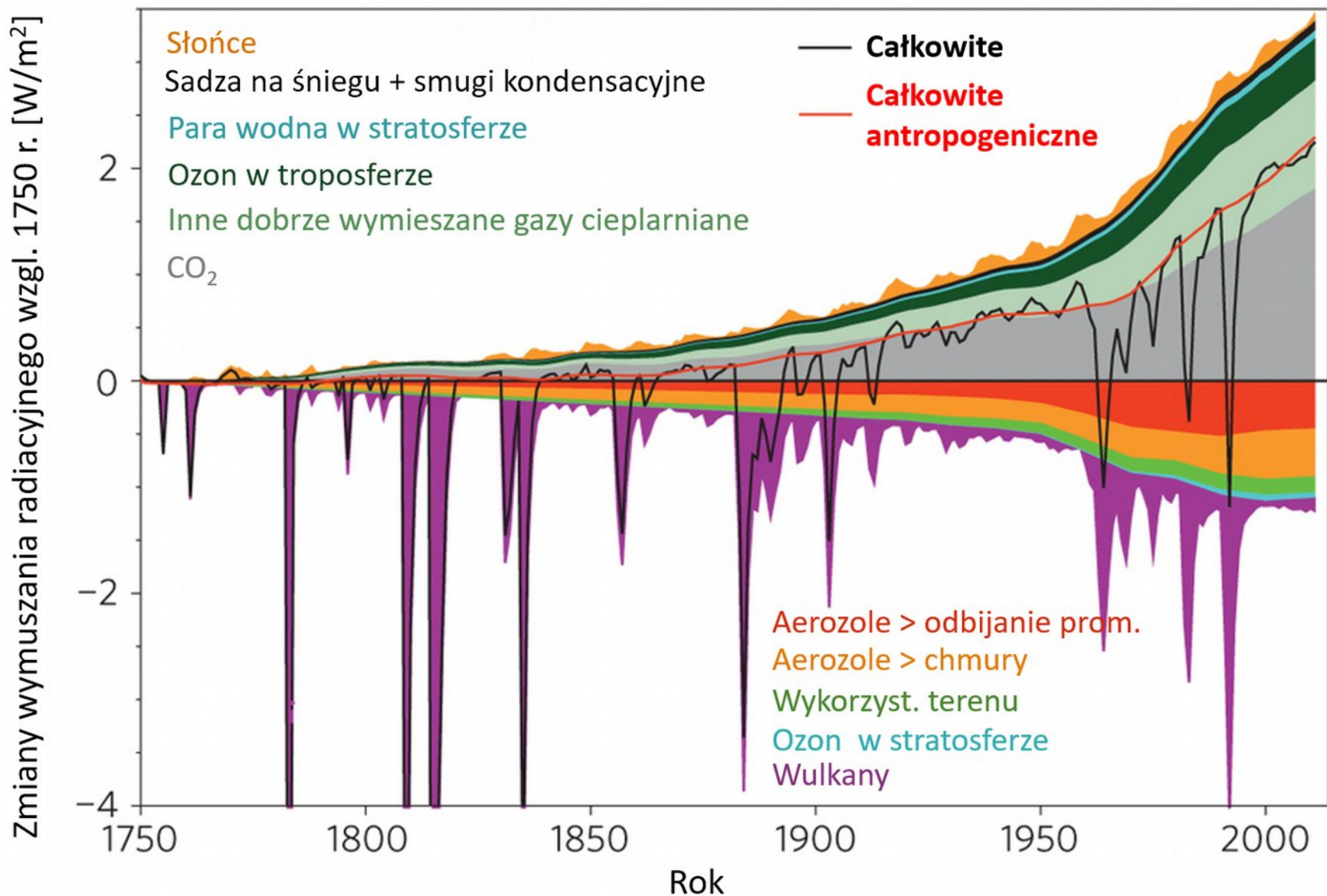


Wymuszenie radiacyjne w ostatnich latach: jak zmieniły się strumienie promieniowania w systemie klimatycznym od 1750r. wskutek zmian składu atmosfery, zmian albedo, zmian w dopływie promieniowania słonecznego.

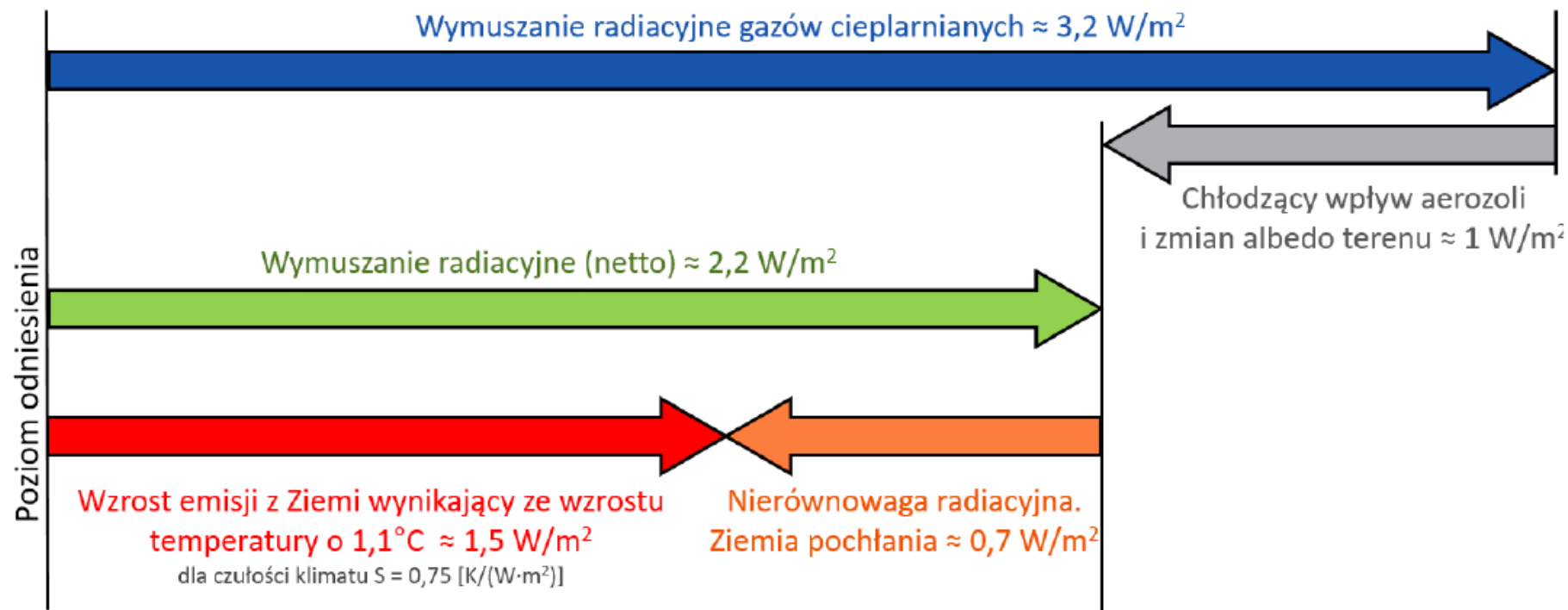


Para wodna: szczególna rola – szybkie sprzężenie zwrotne





Wymuszanie radiacyjne różnych czynników, zarówno naturalnych (Słońce, wulkany), jak i antropogenicznych (pozostałe) od 1750 do 2011 r. względem sytuacji z 1750 r. Na górze czynniki działające w kierunku ocieplenia klimatu, na dole działające chłodząco. Czerwona linia, przekraczająca ostatnio $2 \text{ W}/\text{m}^2$, pokazuje wymuszanie radiacyjne powodowane przez czynniki antropogeniczne; linia czarna pokazuje całkowite wymuszanie radiacyjne.



Wymuszenie radiacyjne $2,2 \text{ W/m}^2$ doprowadziło do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi, w wyniku którego wypromieniowuje ona $1,5 \text{ W/m}^2$ więcej energii niż kiedyś.

Pozostała nierównowaga energetyczna równa $0,7 \text{ W/m}^2$ prowadzi do dalszego wzrostu energii (nagrzewania się) ziemskiego systemu klimatycznego.

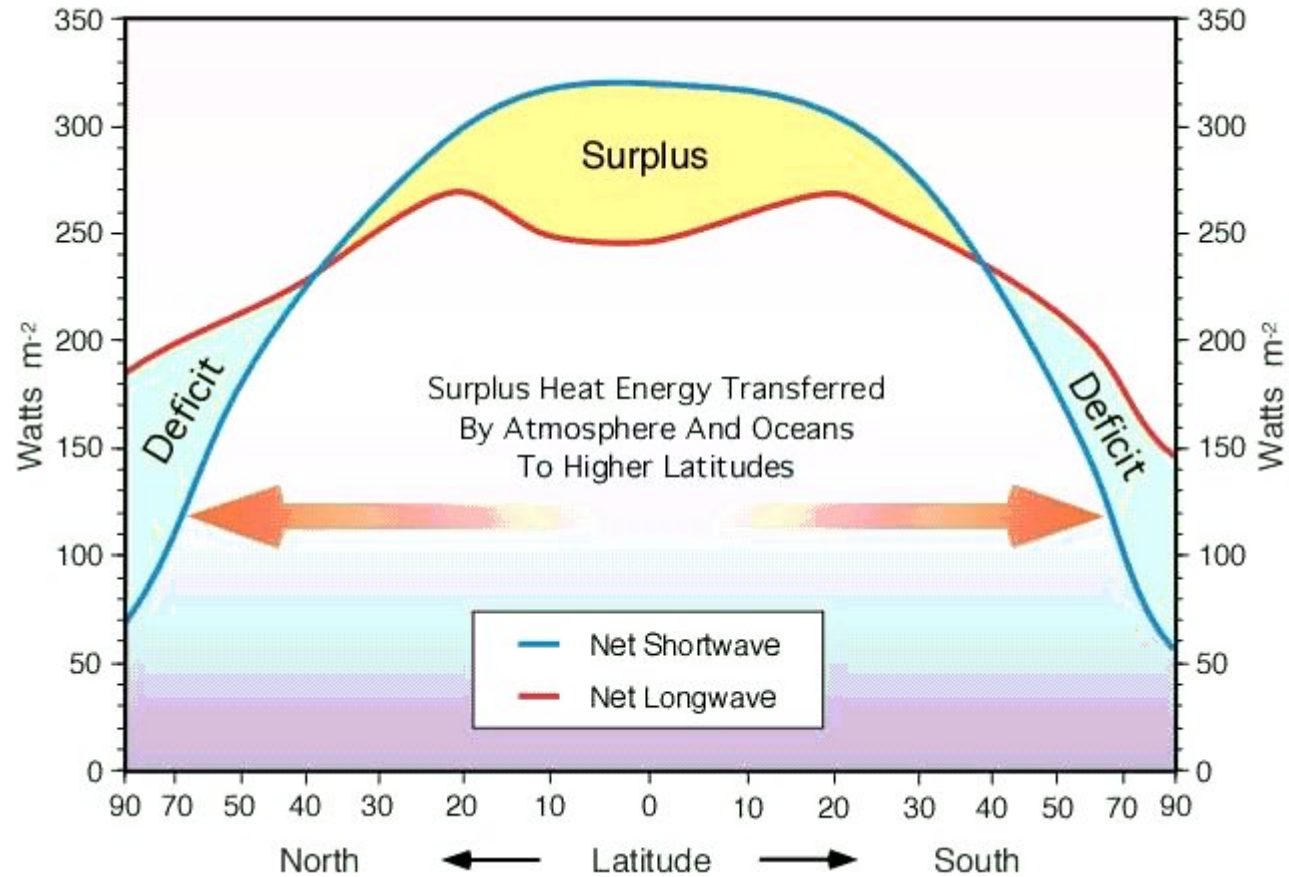
Wartości są przybliżone, zaokrąglone i zbilansowane, jednak każda z nich jest obarczona pewnym stopniem niepewności – największym dla aerozoli atmosferycznych oraz czułości klimatu, najmniejszym dla mierzonej sumarycznej nierównowagi radiacyjnej.

Bilans promieniowania - dopływu i odpływu ciepła – w skali całej planety w stanie stacjonarnym jest bliski równowagi.

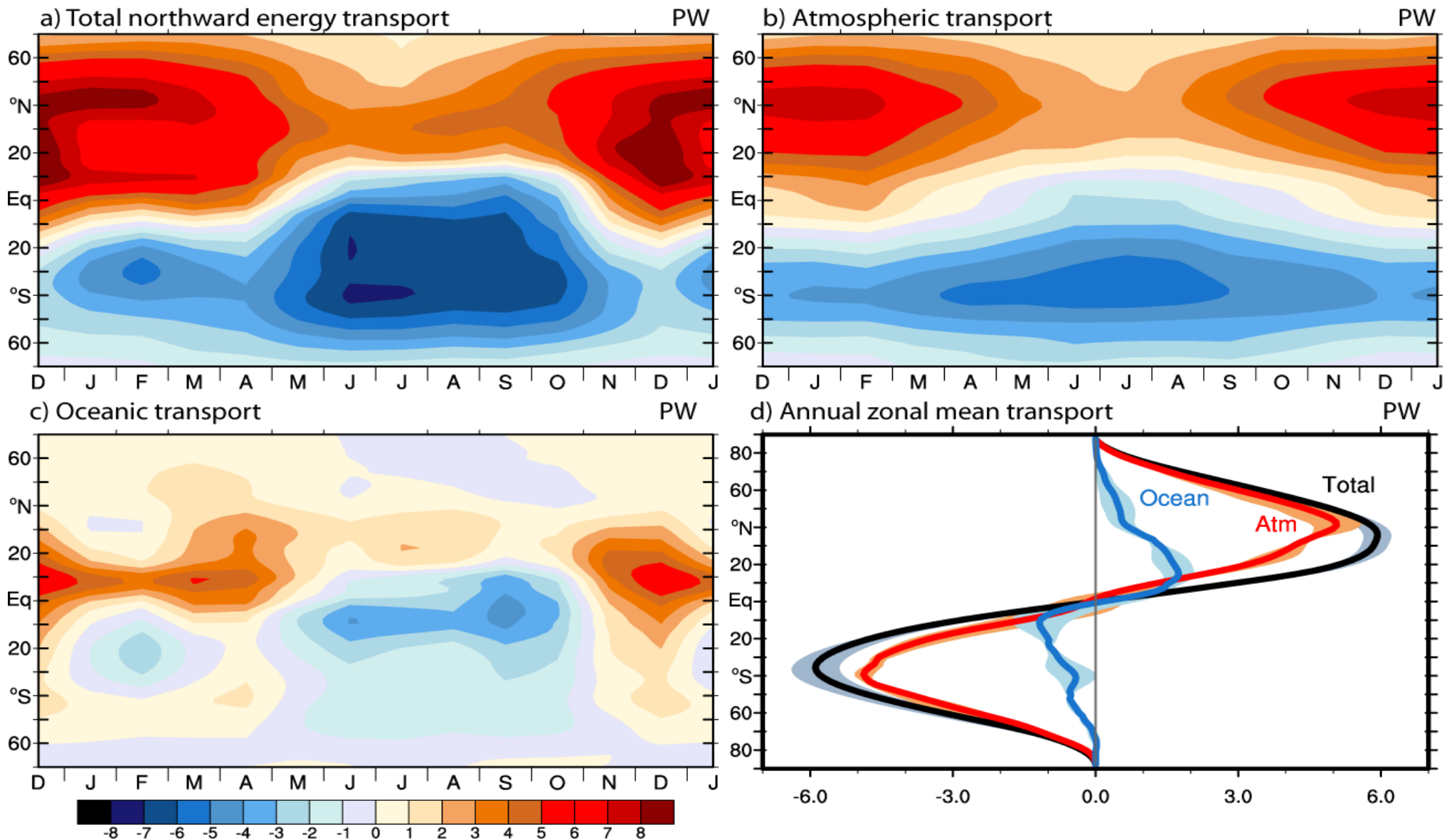
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

Lokalne zmiany w bilansie (wewnątrz układu Ziemia-Atmosfera) mogą zachodzić bez zmian w dopływie energii z zewnątrz, wyłącznie wskutek zmienności własności atmosfery – zawartości gazów cieplarnianych, aerozoli, chmur oraz tzw. mechanizmów redystrybucji (w pionie - konwekcja, cykl hydrologiczny – i po powierzchni globu - cyrkulacje atmosferyczne, prądy morskie, przewodnictwo ciepłe w głąb gruntu).

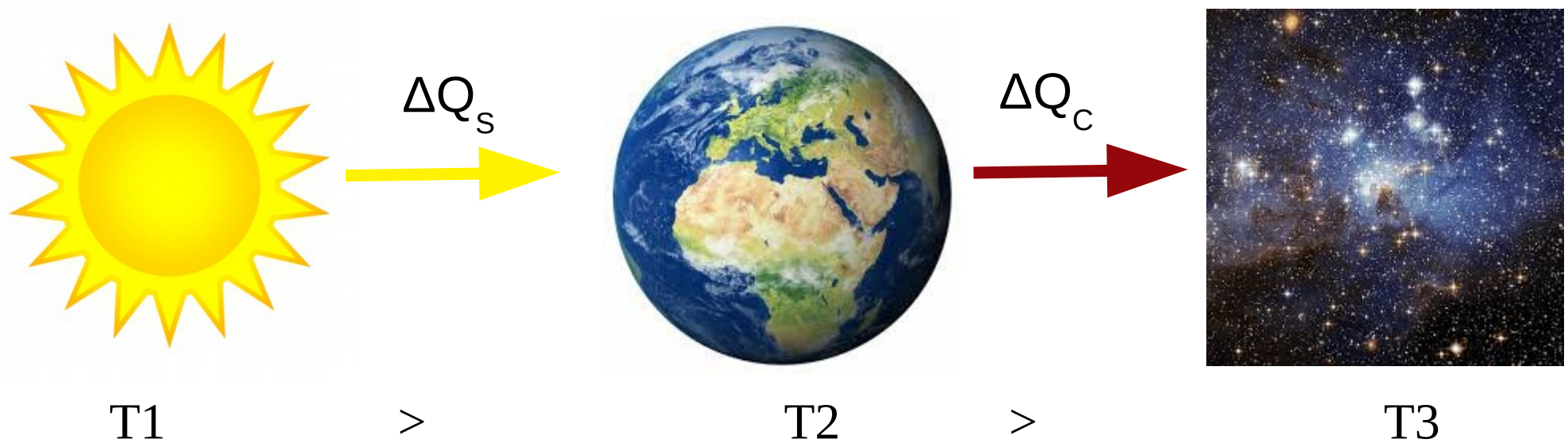
Mechanizmy transferu energii za pośrednictwem promieniowania wraz procesami redystrybucji energii kształtują pogodę i klimat (wieloletnie statystyki pogody).



Bilans promieniowania słonecznego i podczerwonego w zależności od szerokości geograficznej. Tam gdzie występuje nadwyżka (Surplus) promieniowania słonecznego planeta ogrzewa się (średnio) wskutek pochłaniania promieniowania. Tam gdzie przeważa emisja promieniowania podczerwonego (Deficit), przeważa chłodzenie. Cyrkulacje atmosferyczne i prądy morskie przenoszą ciepło od obszarów z nadwyżką bilansu promieniowania do obszarów z deficytem. (rysunek: [Encyclopedia of The Earth](#))



**Roczne rozkłady strumieni energii transportowanej na północ: a – całkowitej, b – transportowanej przez atmosferę, c – transportowanej przez ocean, oraz średnia roczna – d, obliczone na podstawie obserwacji satelitarnych i symulacji globalnych (szare obszary na panelu d – niepewność w zakresie $\pm 2\sigma$).
Jednostki – petawaty (10^{15} W).**



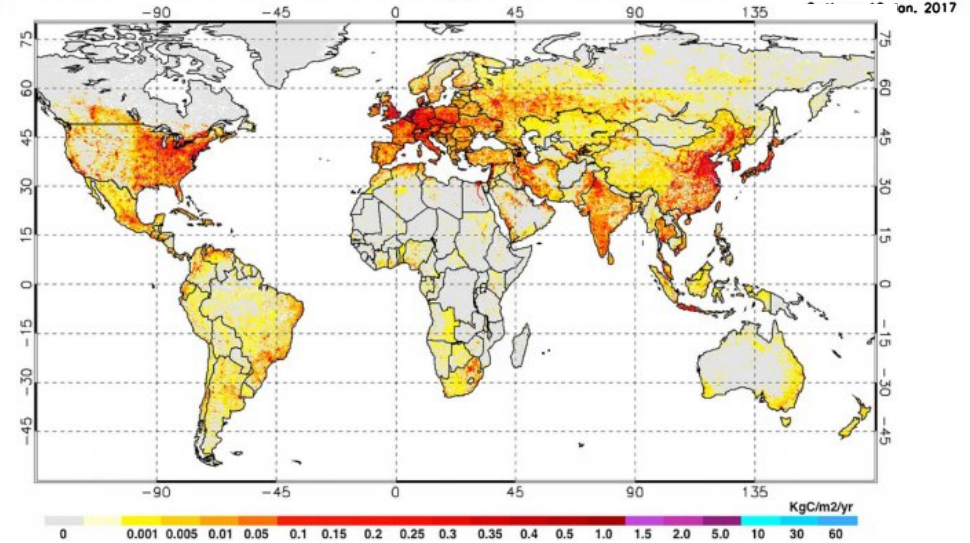
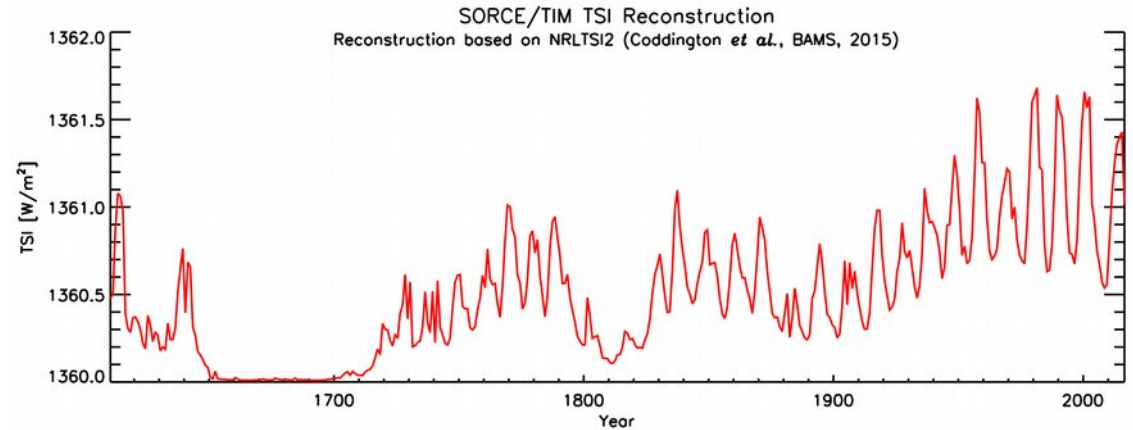
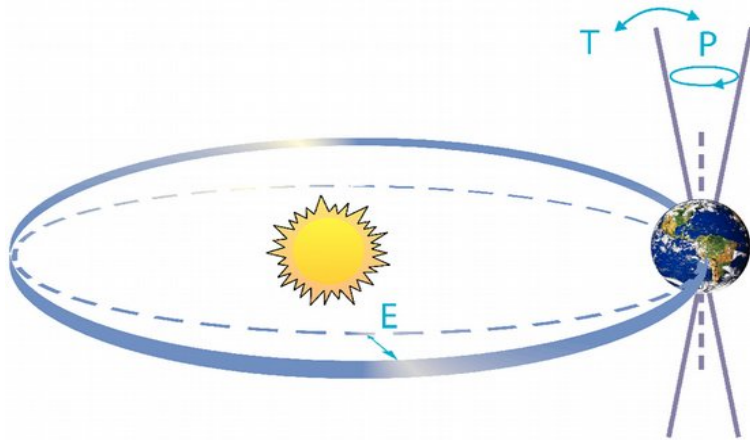
Aby temperatura Ziemi była stała
strumień ciepła otrzymywanego przez Ziemię od Słońca ΔQ_s ($/\Delta t$)
musi być równoważony
strumieniem ciepła oddawanym przez Ziemię w kosmos ΔQ_c ($/\Delta t$).

Temperatura Ziemi rośnie, gdy $\Delta Q_s > \Delta Q_c$

Temperatura Ziemi spada, gdy $\Delta Q_s < \Delta Q_c$

Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym.

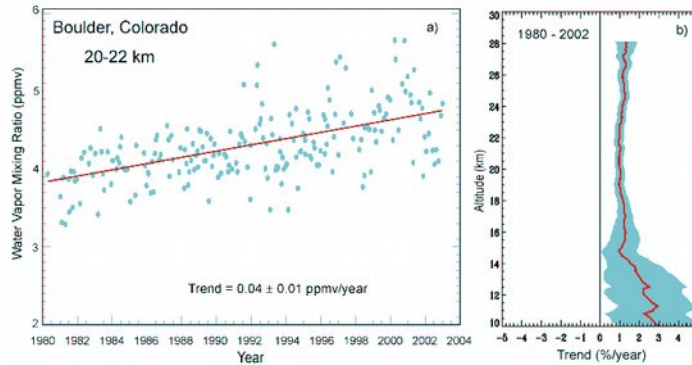
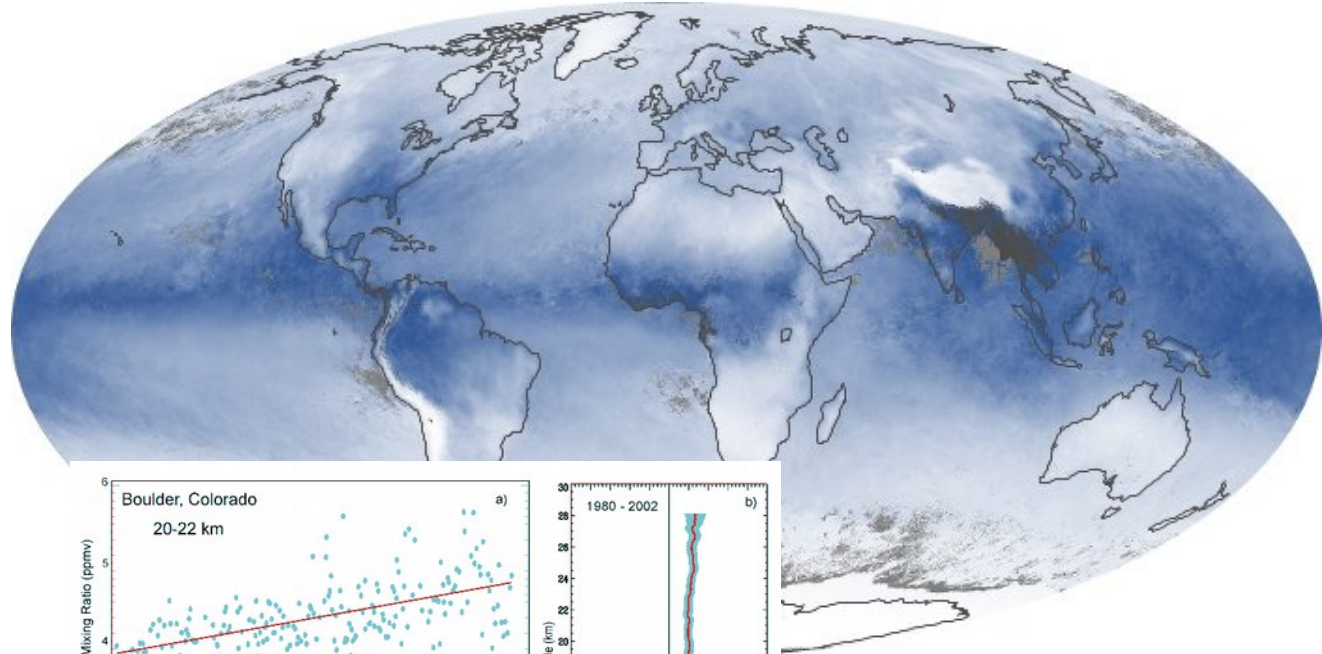
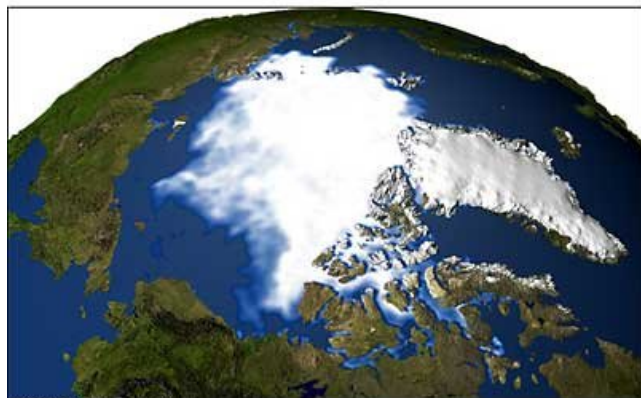
Wymuszenia inicjują zmiany klimatu.



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

Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym.

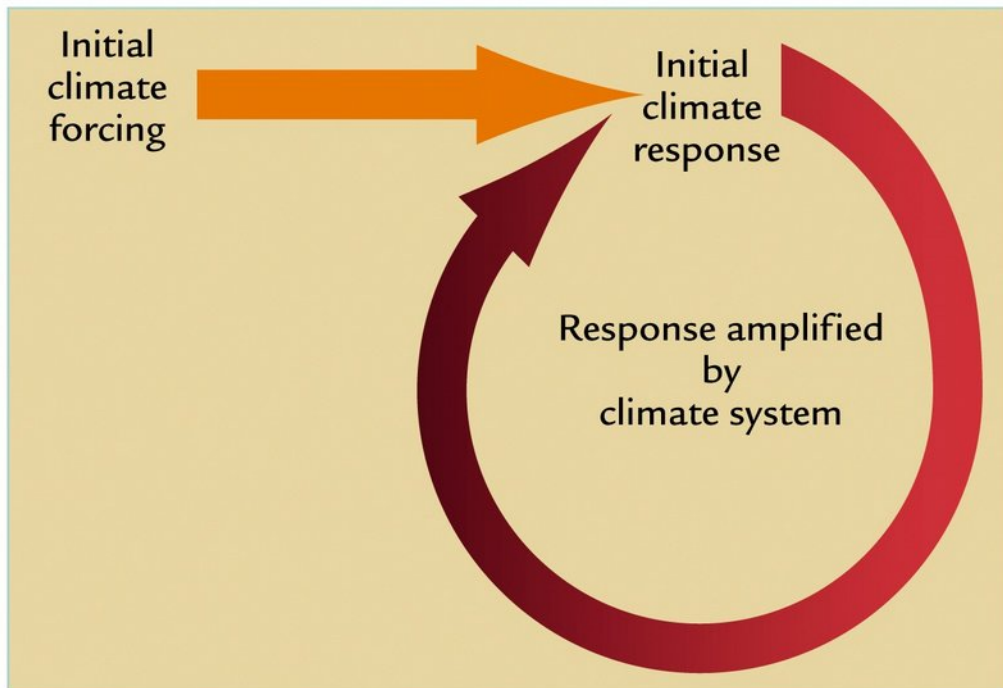
Sprzężenia to procesy zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego, które **skutkują dalszymi zmianami klimatu**.



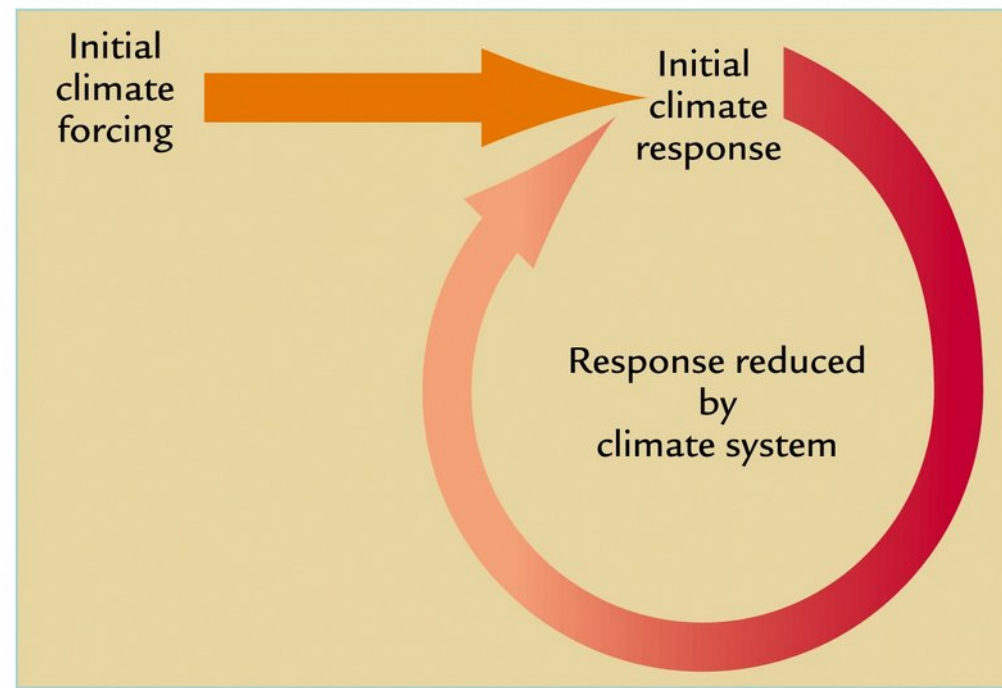
Przykłady: zmiany albedo wskutek zmian zlodzenia czy zmiany zawartości pary wodnej w powietrzu wskutek zmian temperatury.

Sprężenia mogą być dodatnie lub ujemne.

Działanie silnych wymuszeń lub dodatnich sprzężeń może prowadzić do przekroczenia punktów krytycznych i gwałtownych zmian w systemie klimatycznym.

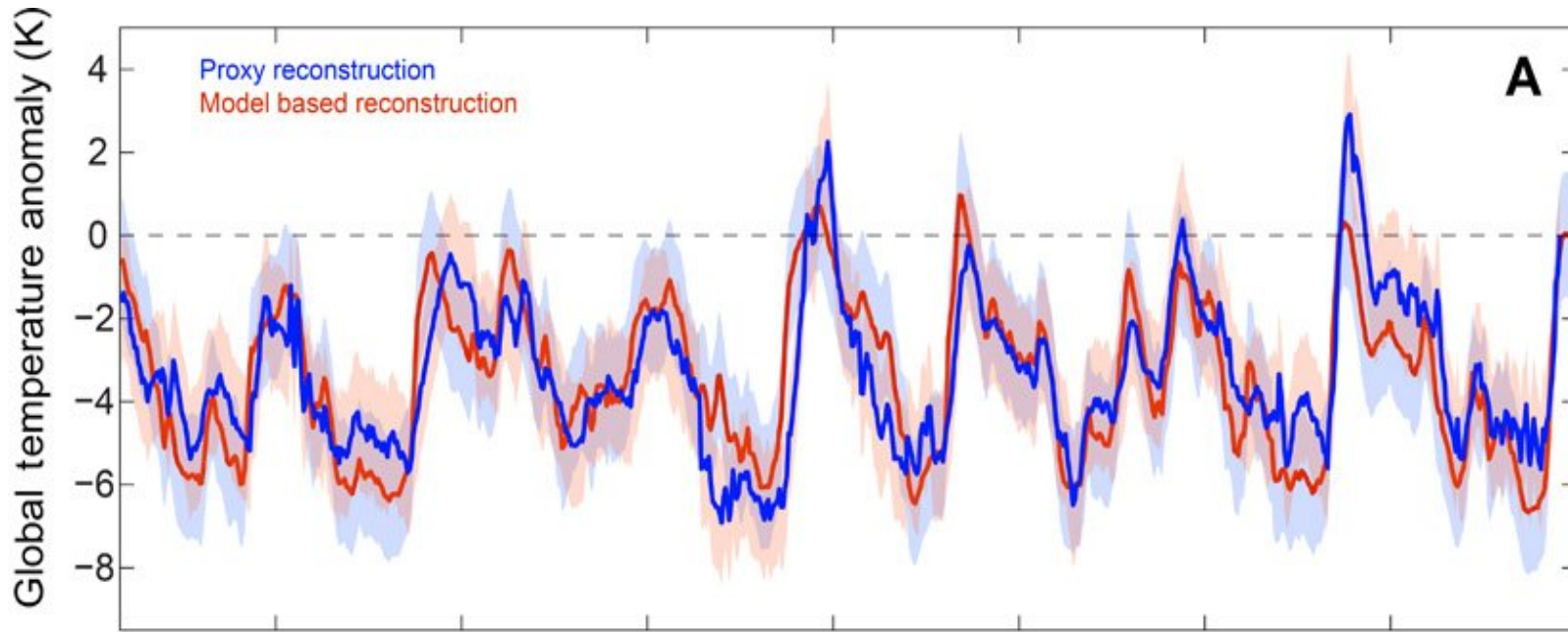


A Positive feedback

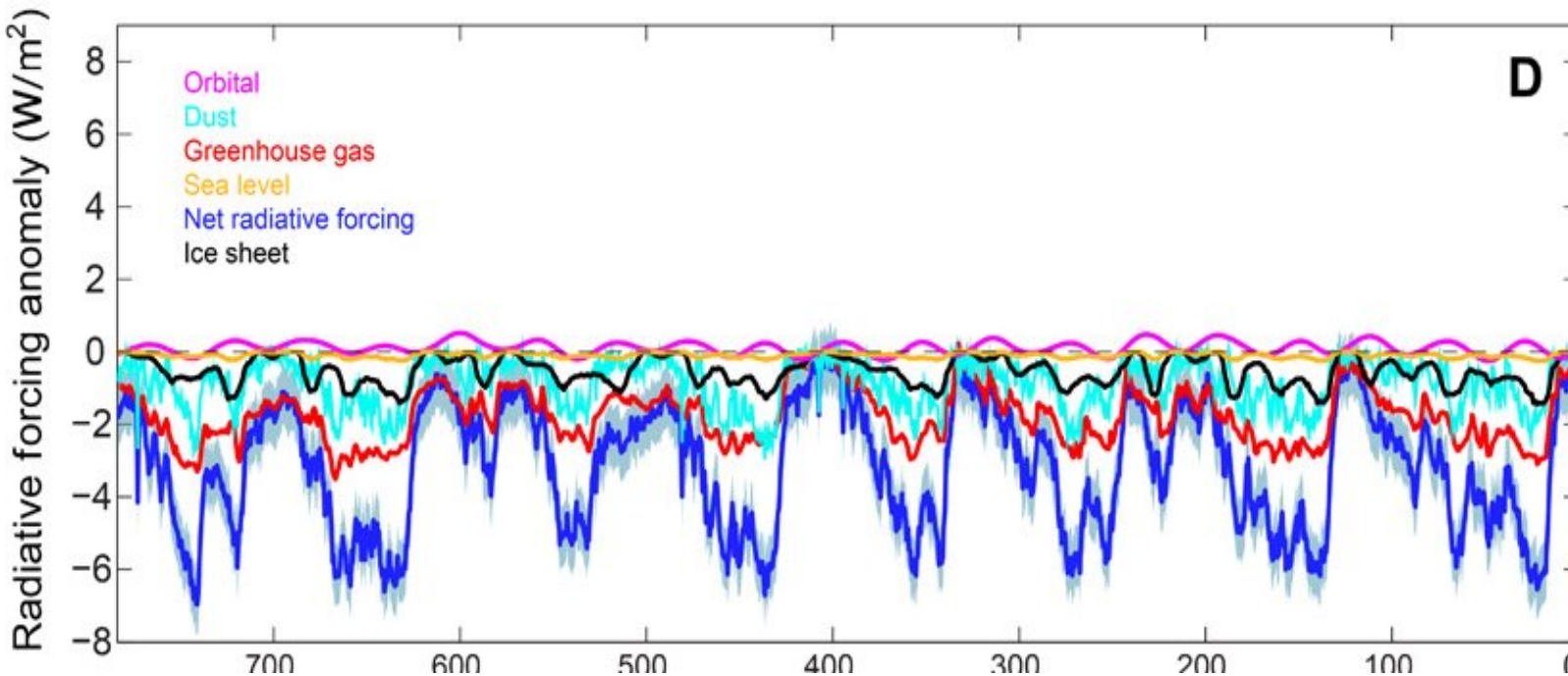


B Negative feedback

Wymuszenia i sprzężenia w ostatnich 800tys.lat



A: Globalne anomalie temperatur, niebieskie – proxy, czerwone – modele.

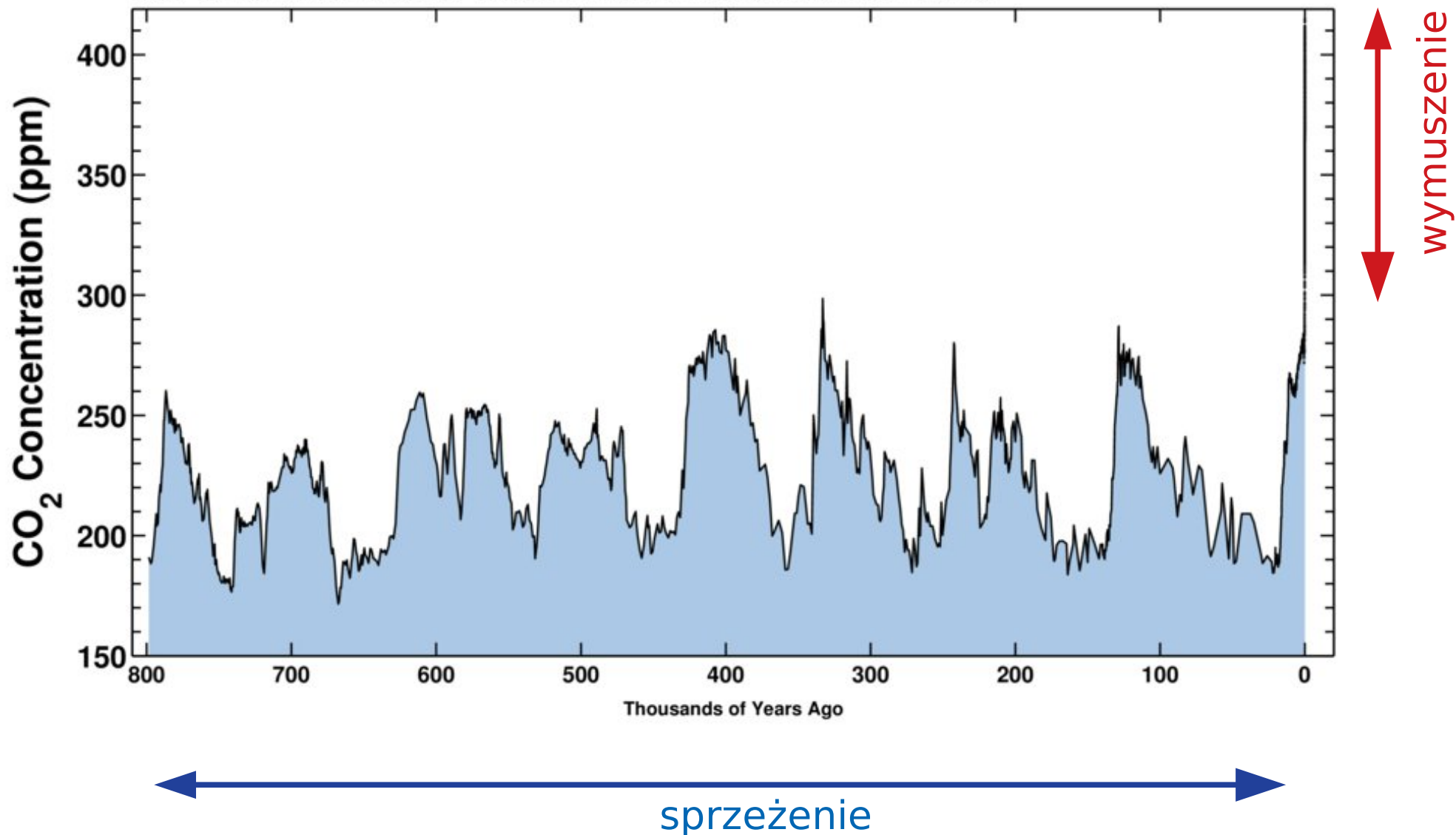


D: Anomalie radiacyjne, których suma jest odpowiedzialna za zmiany temperatury globu. Suma wymuszeń radiacyjnych: linia niebieska

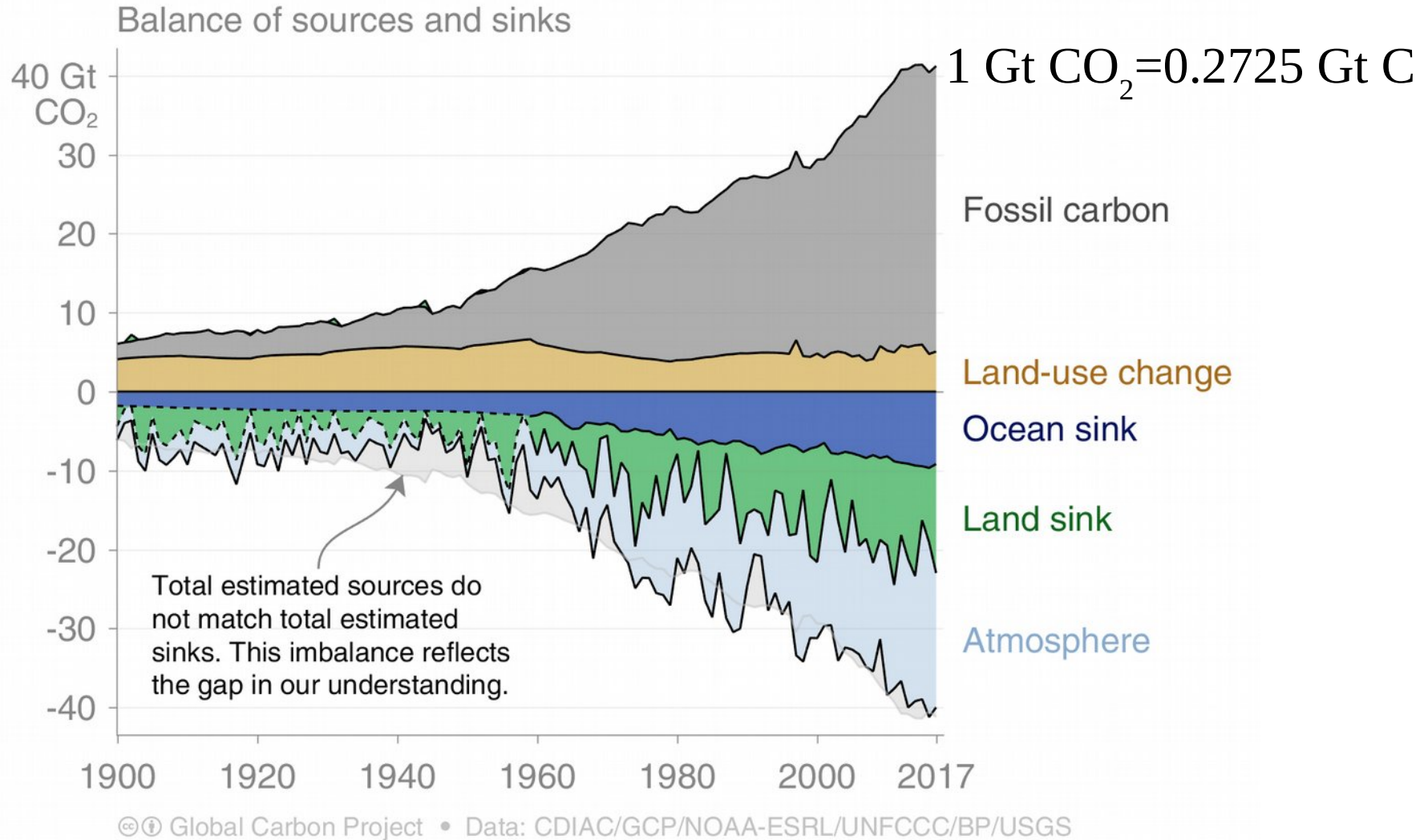
Zmiany CO₂: kiedyś sprzężenie, dziś wymuszenie.

Latest CO₂ reading
September 12, 2019

Ice-core data before 1958. Mauna Loa data after 1958.

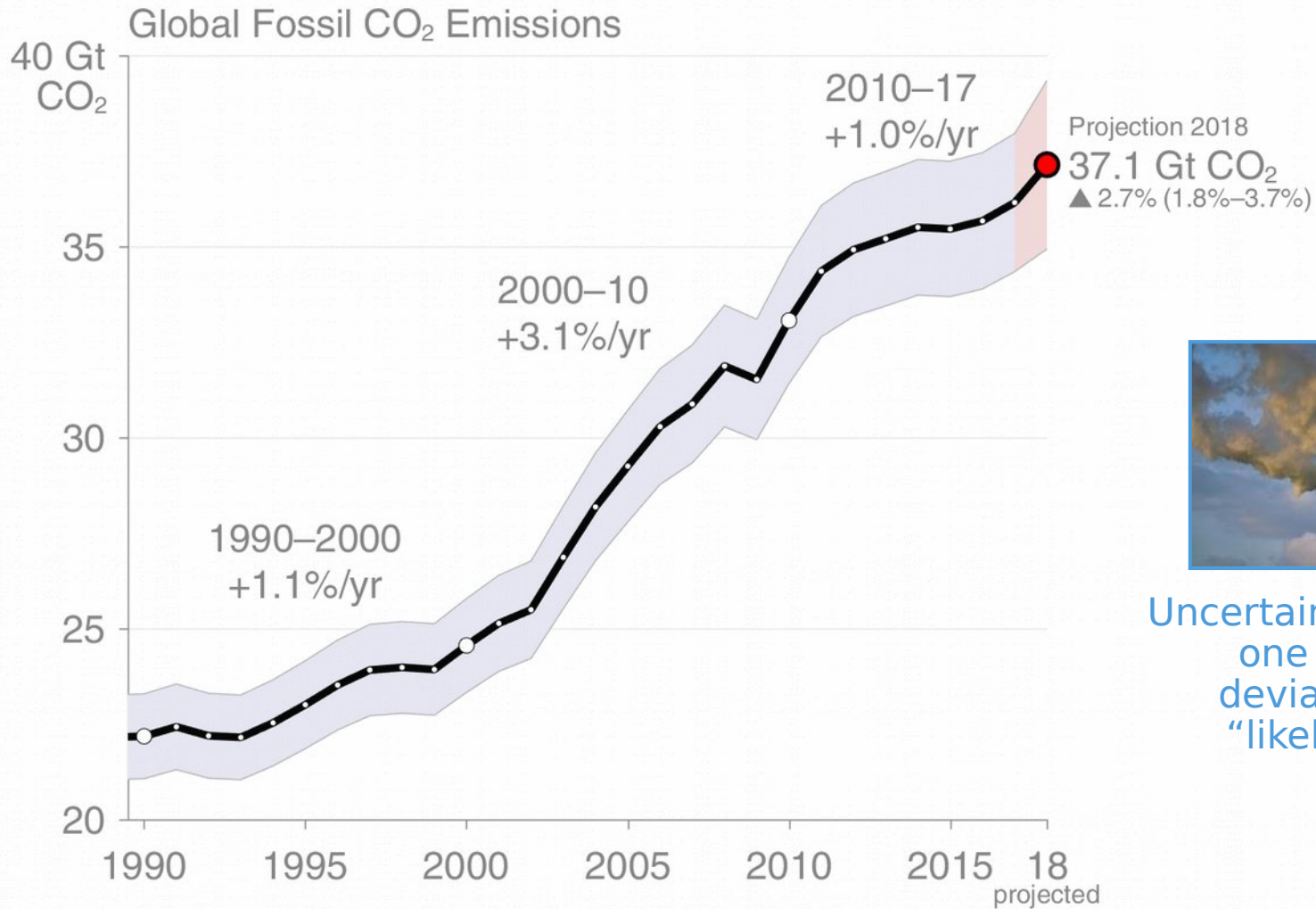


CO₂ z paliw kopalnych, przemysłu, użytkowania gruntu oraz bilans w postaci zmian zawartości w oceanie, atmosferze i glebie



Global Fossil CO₂ Emissions

Global fossil CO₂ emissions: 36.2 ± 2 GtCO₂ in 2017, 63% over 1990
 Projection for 2018: 37.1 ± 2 GtCO₂, 2.7% higher than 2017 (range 1.8% to 3.7%)

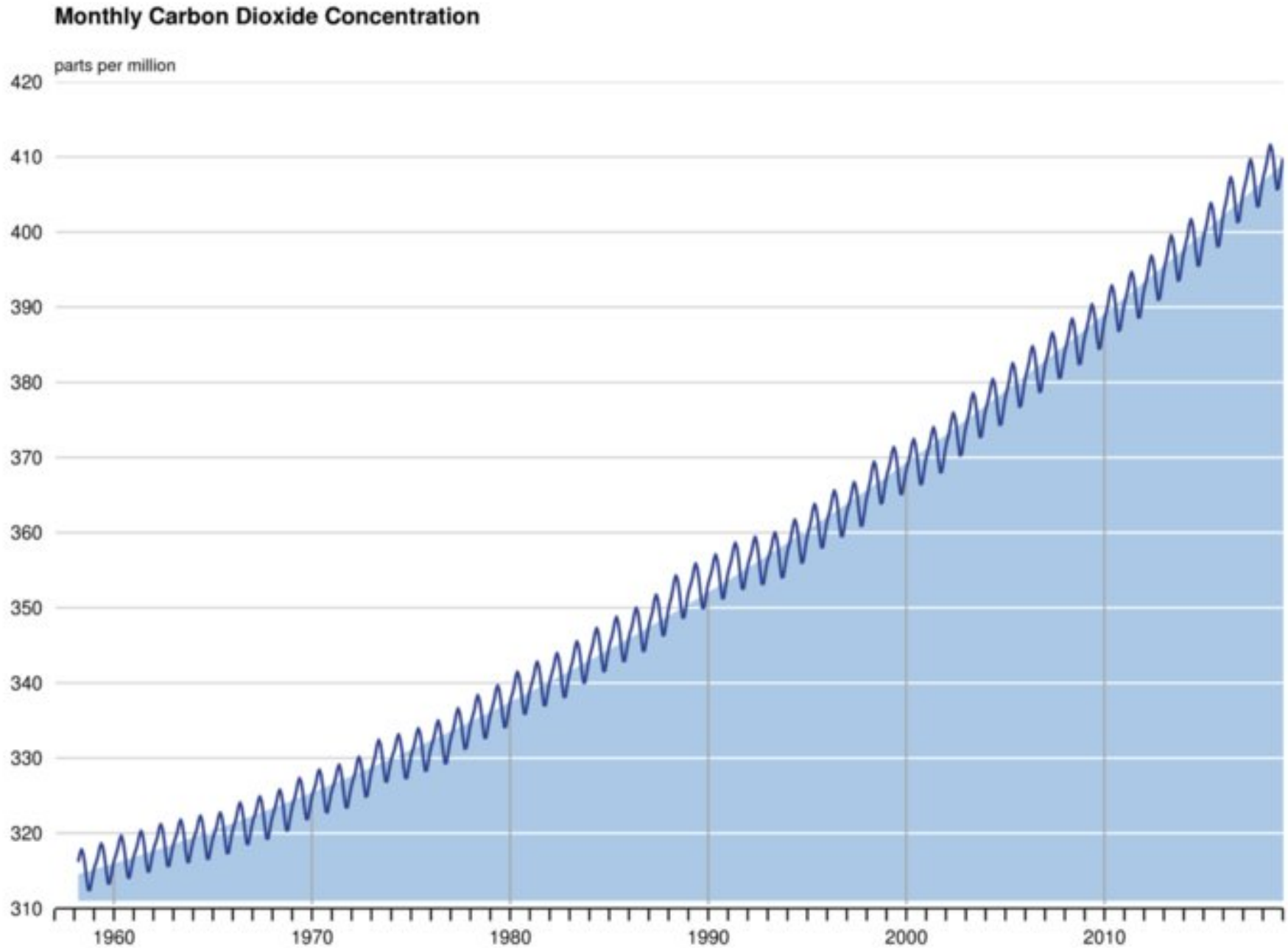


Uncertainty is ±5% for one standard deviation (IPCC “likely” range)

© Global Carbon Project • Data: CDIAC/GCP/BP/USGS

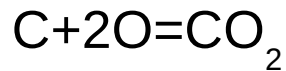
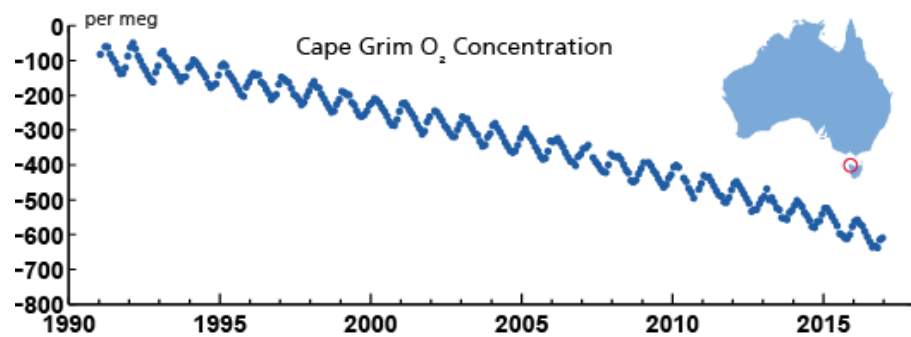
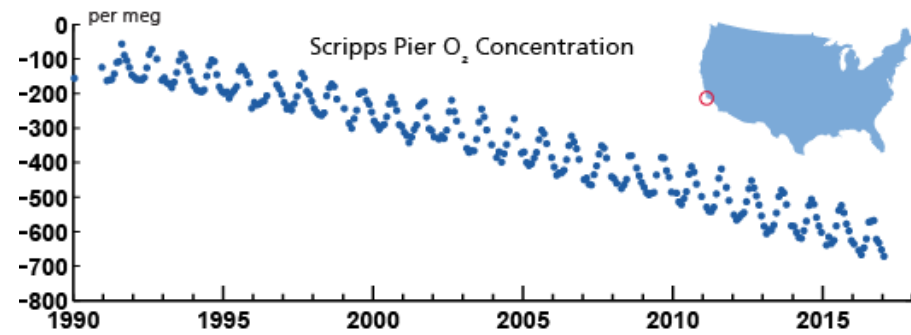
Estimates for 2015, 2016 and 2017 are preliminary; 2018 is a projection based on partial data.
 Source: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2018](#); [Global Carbon Budget 2018](#)

Zmiany koncentracji CO₂ w atmosferze (ppm – cząsteczki na milion)



Inne dowody na antropogeniczność nadwyżki CO₂ w systemie klimatycznym.

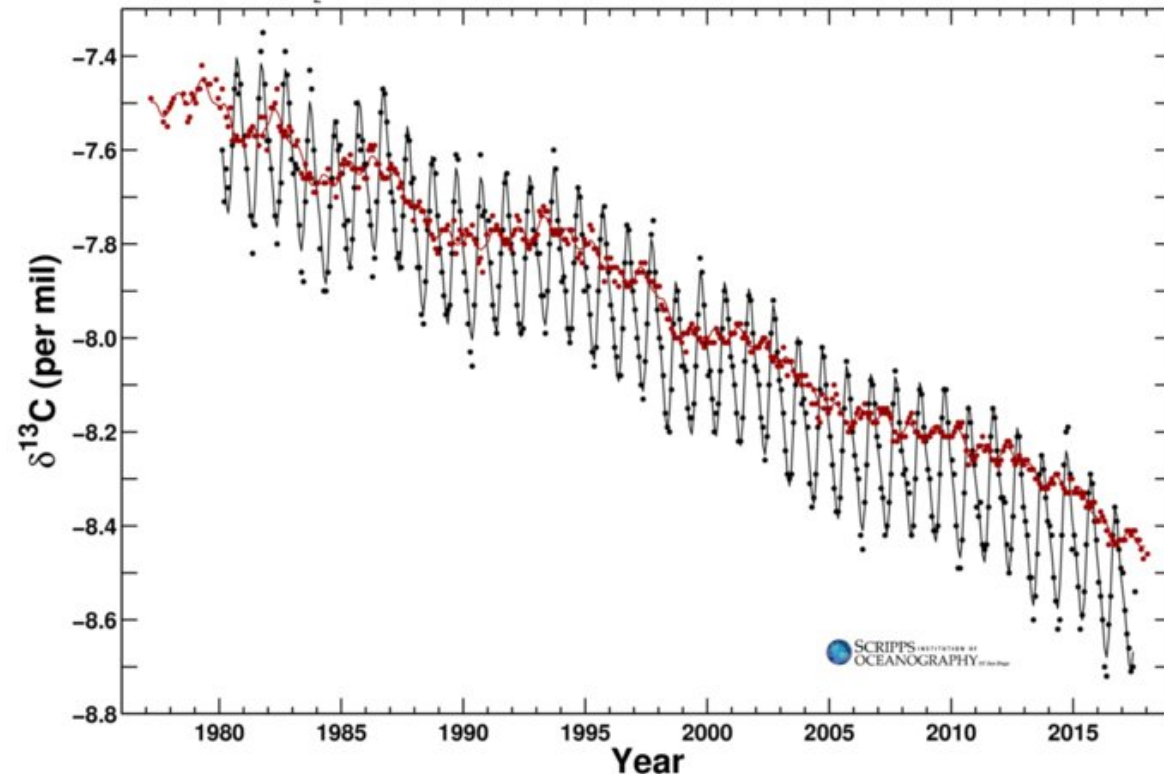
Spada stosunek ¹³C/¹²C .

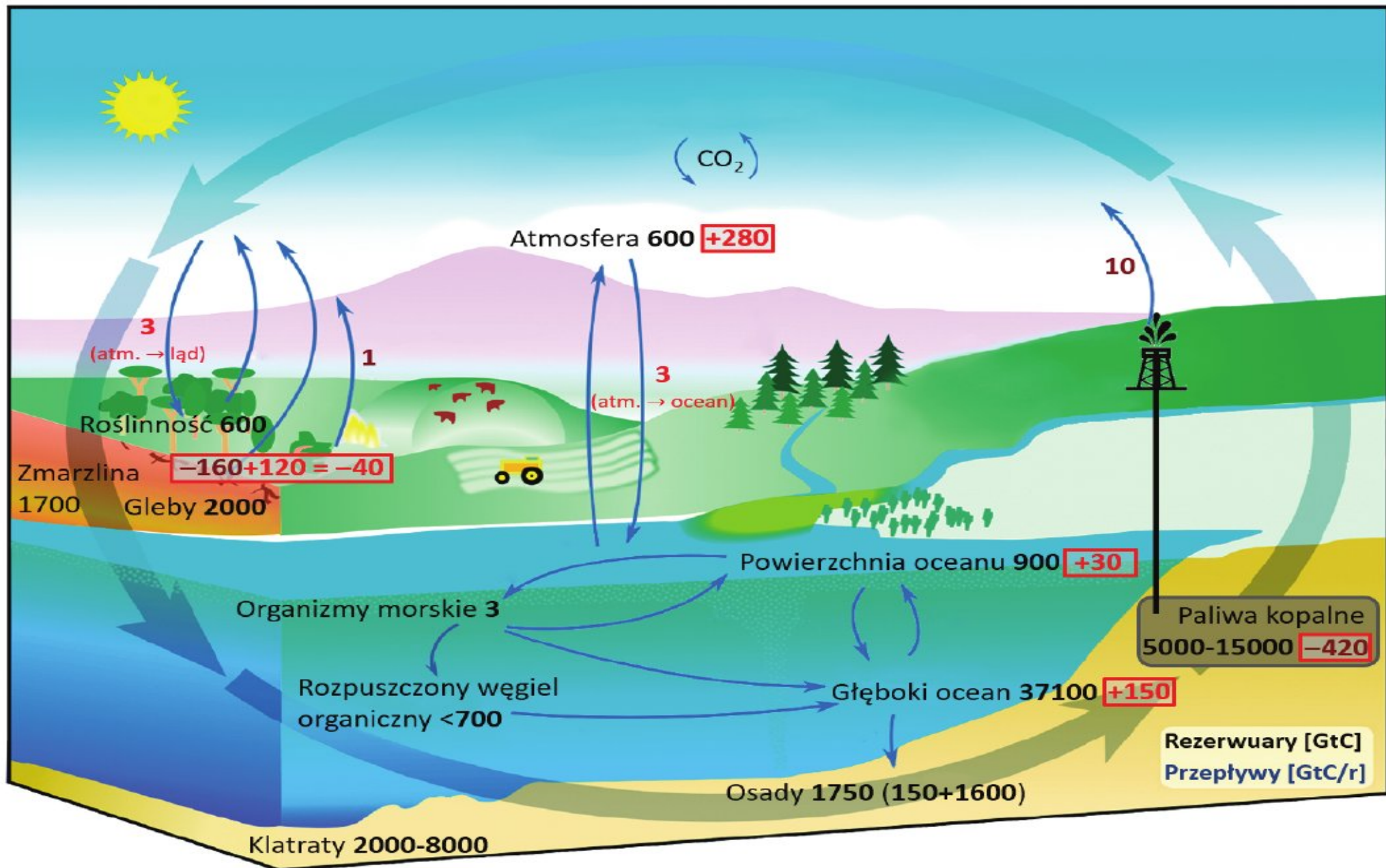


Spada stosunek O₂/N₂ w powietrzu.

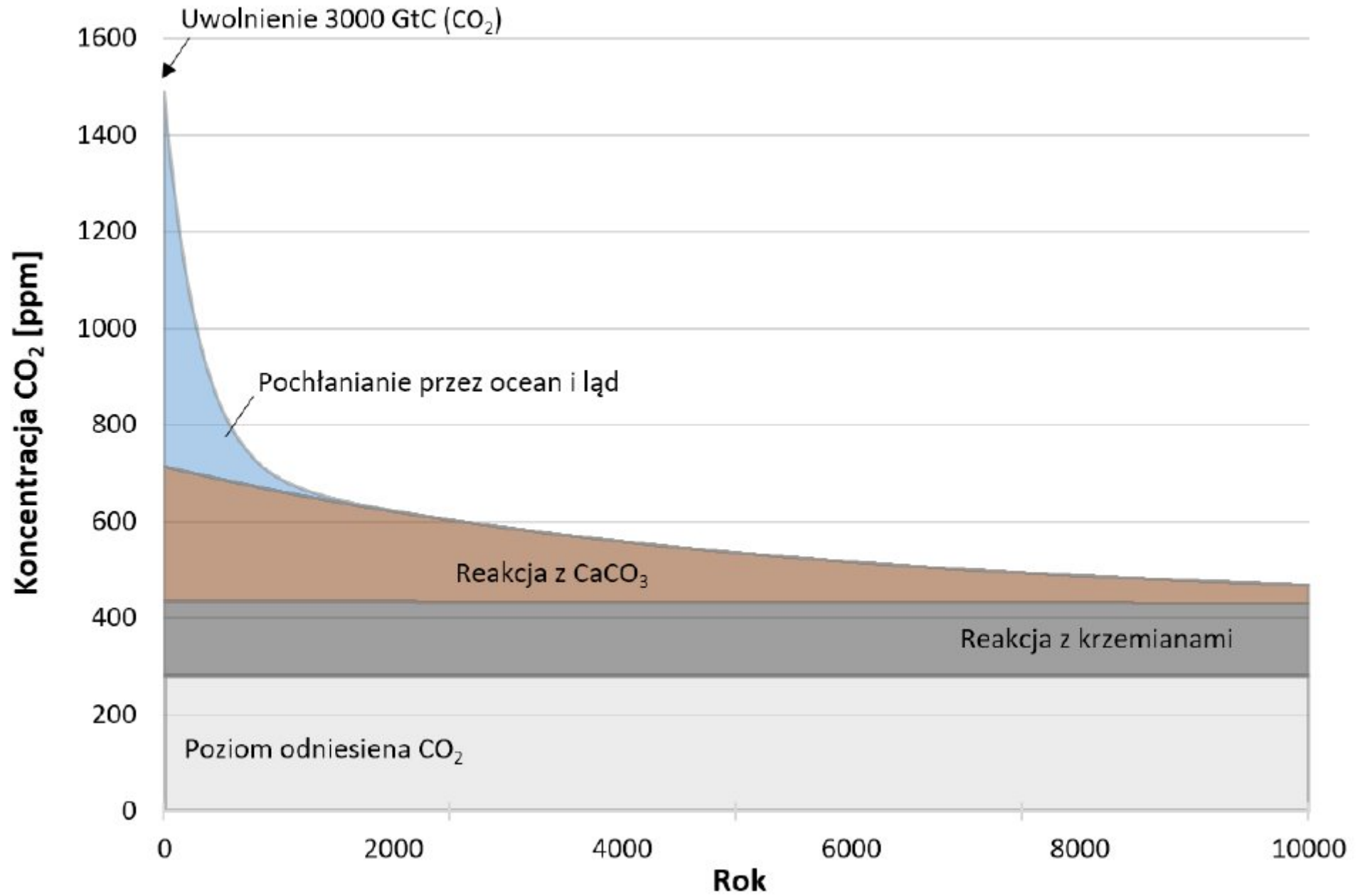
Mauna Loa Observatory, Hawaii and South Pole, Antarctica Monthly Average $\delta^{13}C$ Trends

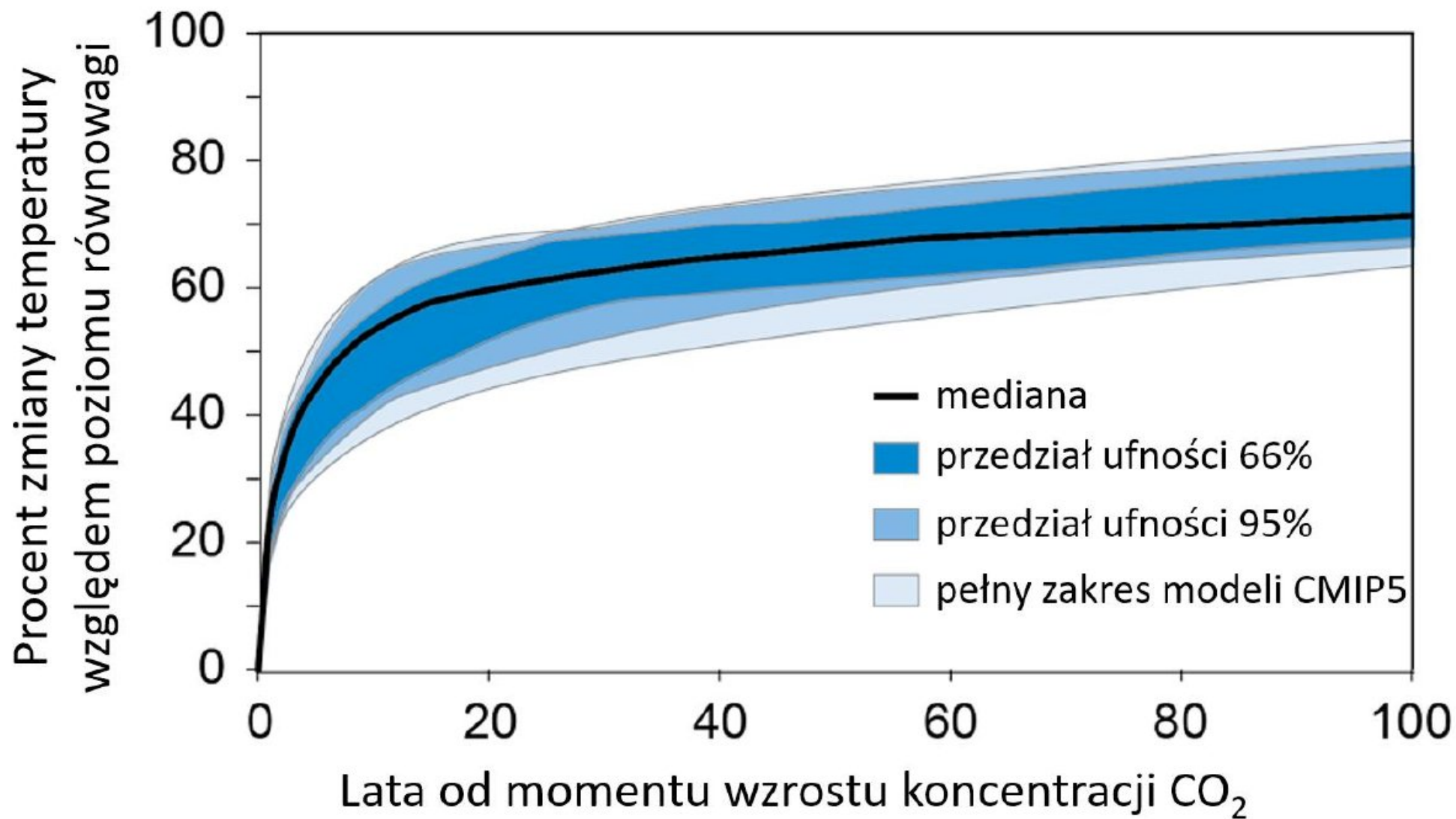
Data from Scripps CO₂ Program Last updated September 2018



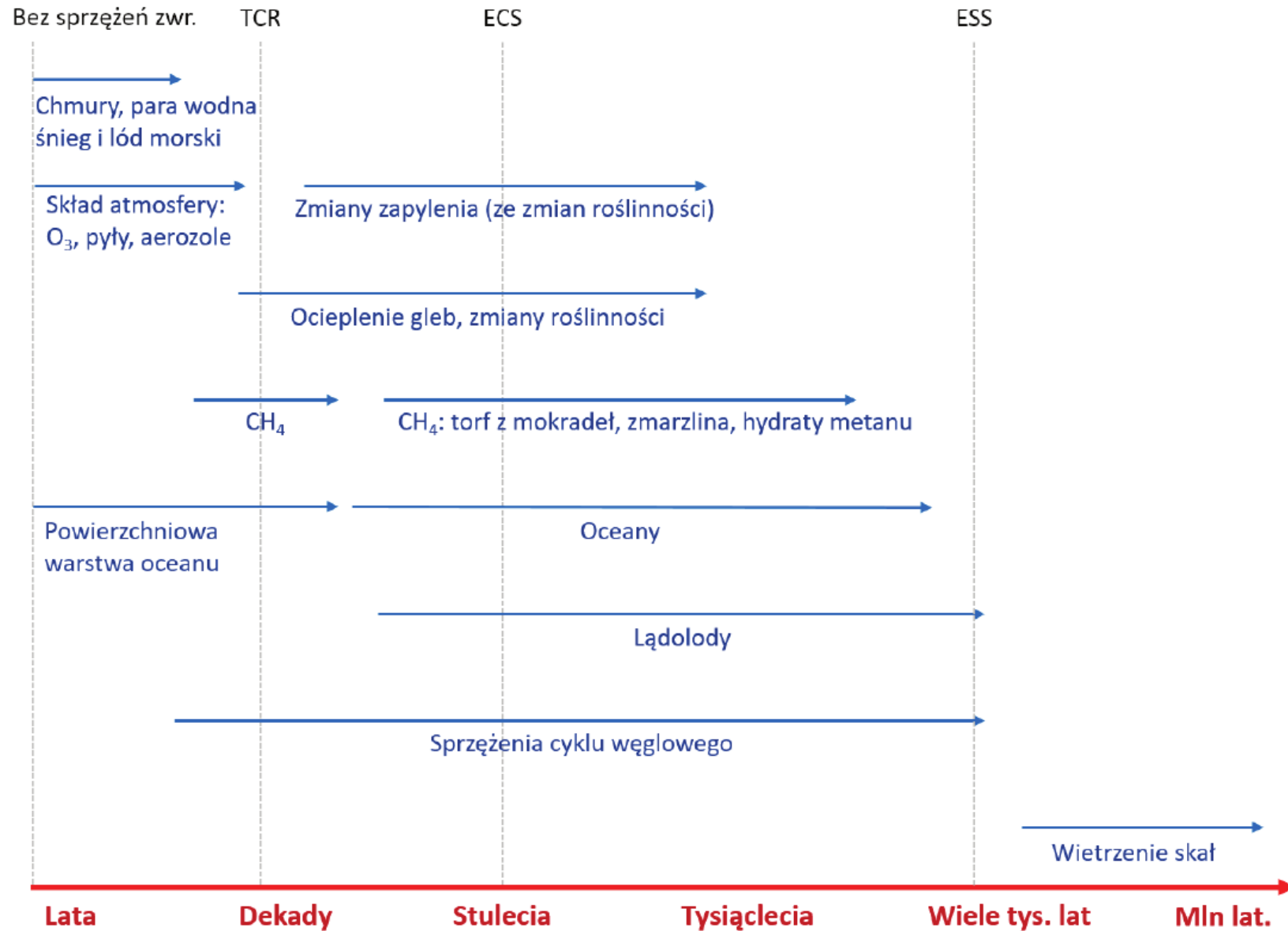


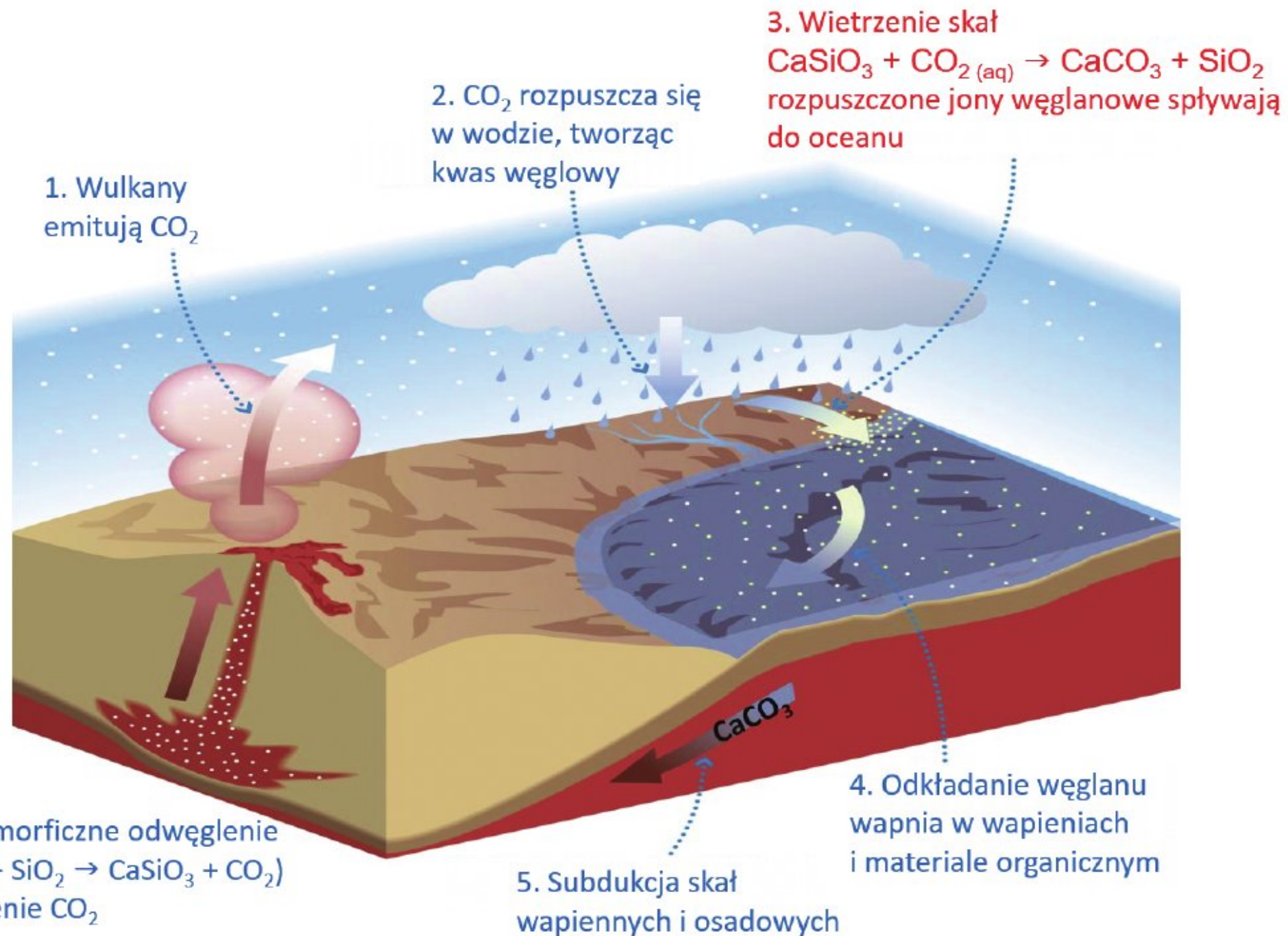
Uproszczony diagram szybkiego cyklu węglowego według stanu na 2015 rok. Brązowe liczby pokazują emisje ze spalania paliw kopalnych i przemysłu (10 GtC) oraz wylesiania (1 GtC). Czerwone liczby bez ramek pokazują zmiany przepływów netto, a w ramkach zmiany ilości węgla w rezerwuarach od 1850 roku.



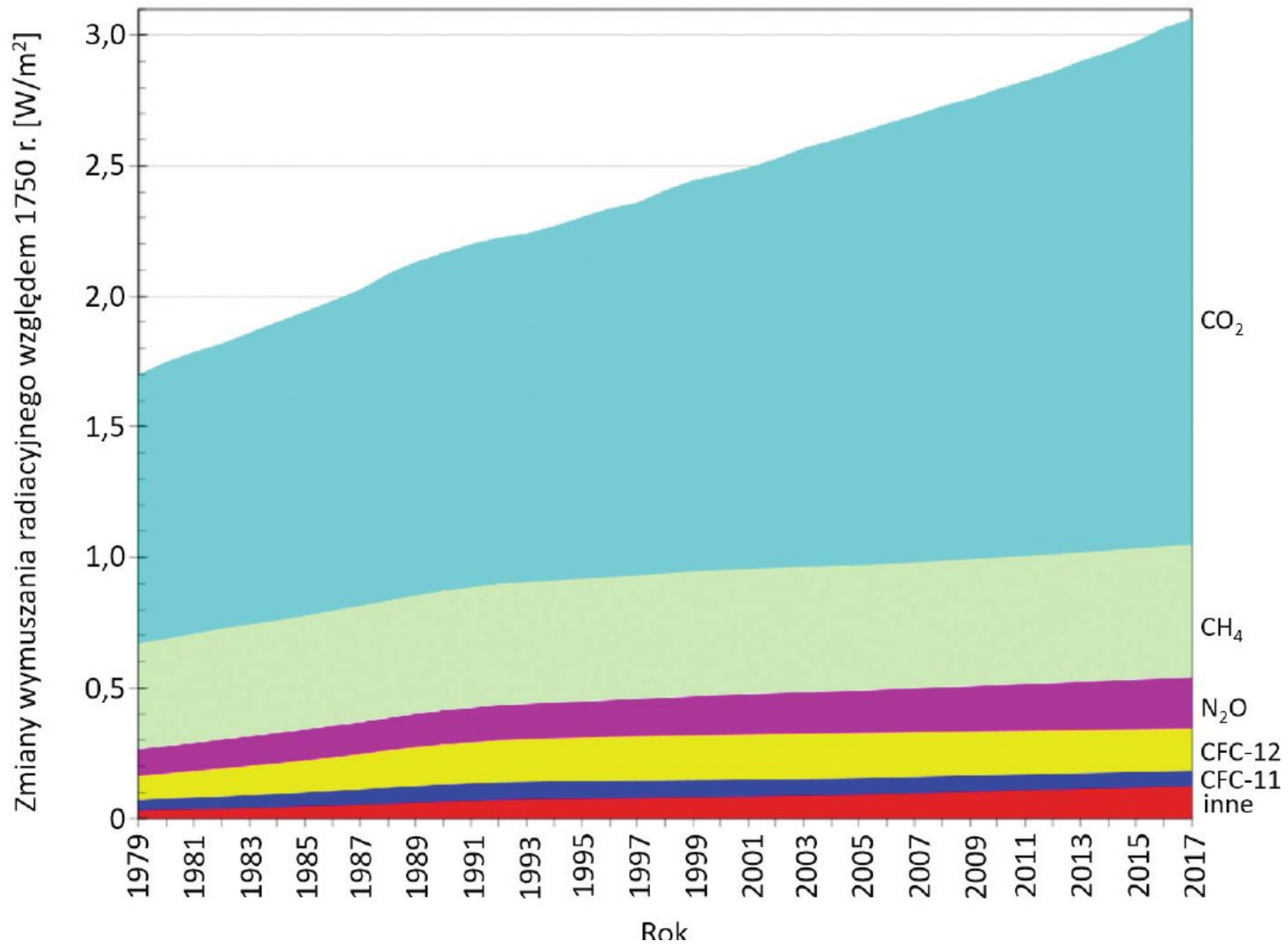


Skala czasowa procesów sprzężeń zwrotnych



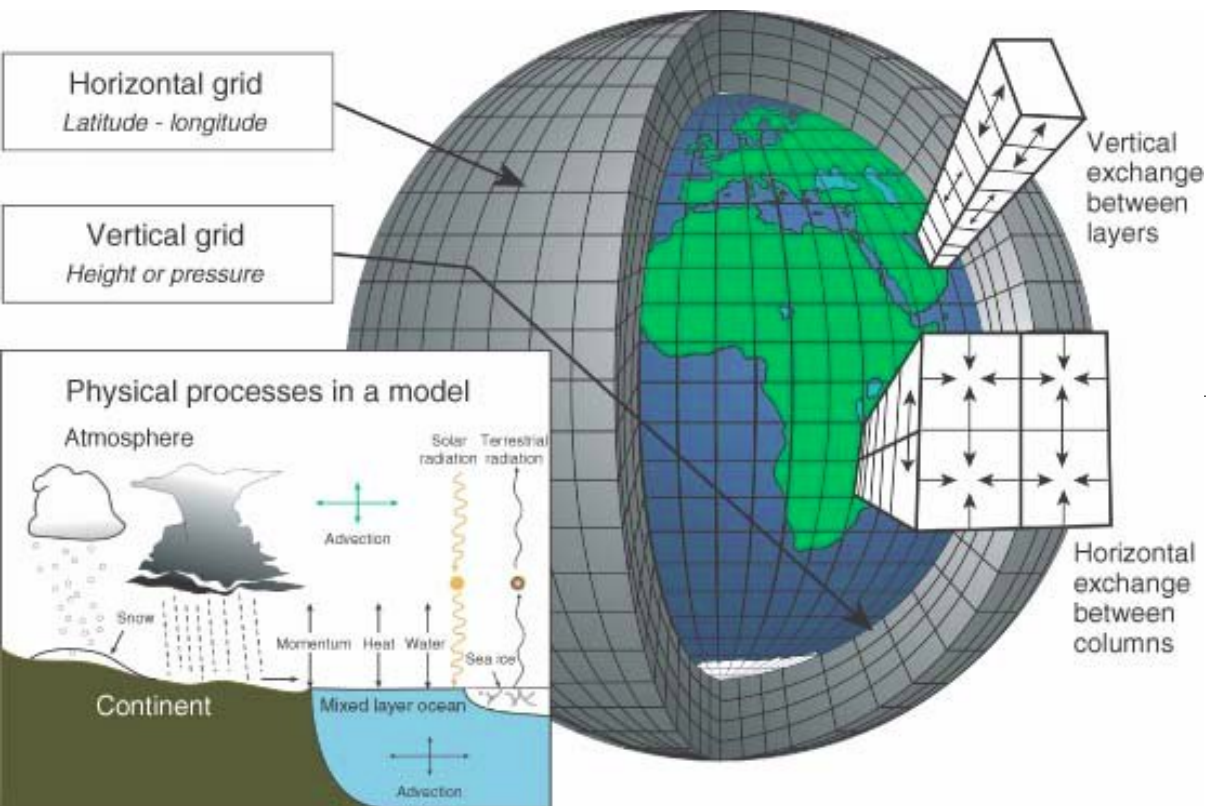


Schemat wolnego cyklu węglowego i działania termostatu węglowego. Reakcja (3) w zapisie skróconym.



Wymuszenie radiacyjne długo żyjących gazów cieplarnianych względem 1750 roku.

Modelowanie klimatu czyli budowa wirtualnej planety dzięki znajomości praw fizyki:



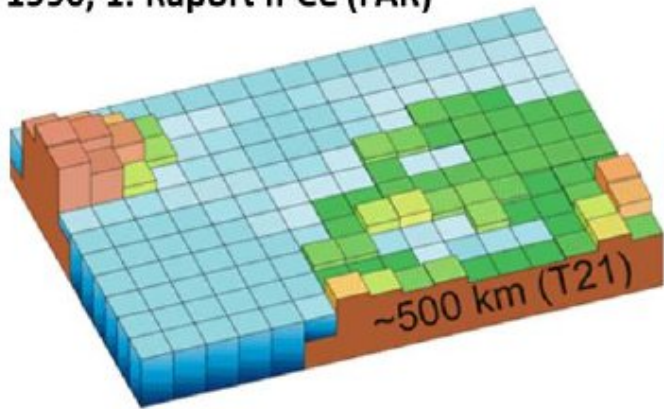
równania hydrodynamiki
równania termodynamiki
prawa transferu radiacyjnego
własności składników atmosfery
promieniowanie słoneczne
oddziaływanie z podłożem
przemiany chemiczne

układ równań modelu

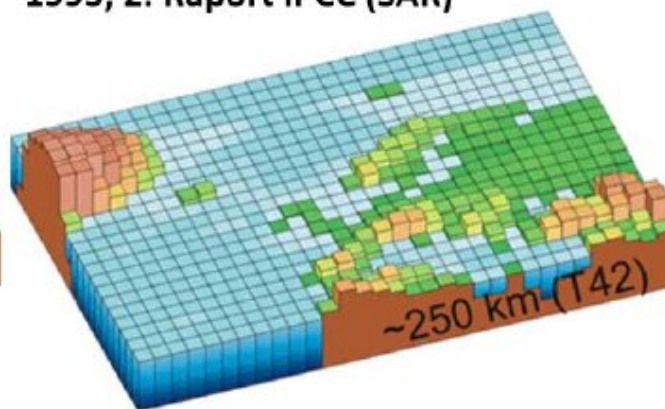
„zakłęcie” w kod numeryczny
uwzględnienie danych
wielki superkomputer

wirtualna rzeczywistość, w której możemy symulować mechanizmy klimatyczne i związki przyczynowo-skutkowe.

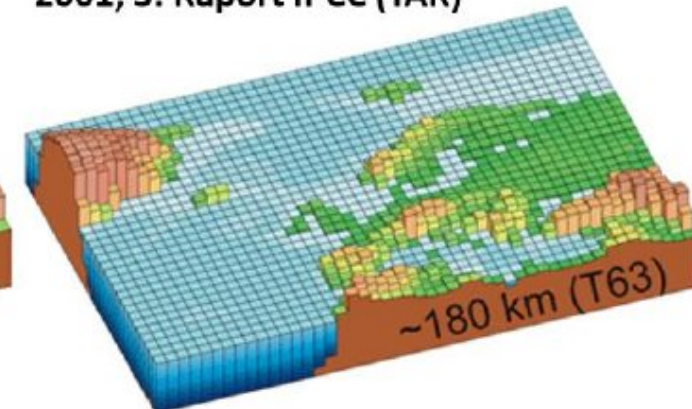
1990, 1. Raport IPCC (FAR)



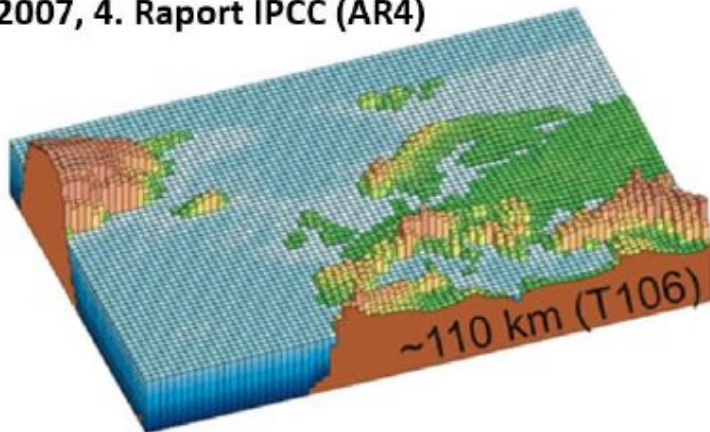
1995, 2. Raport IPCC (SAR)



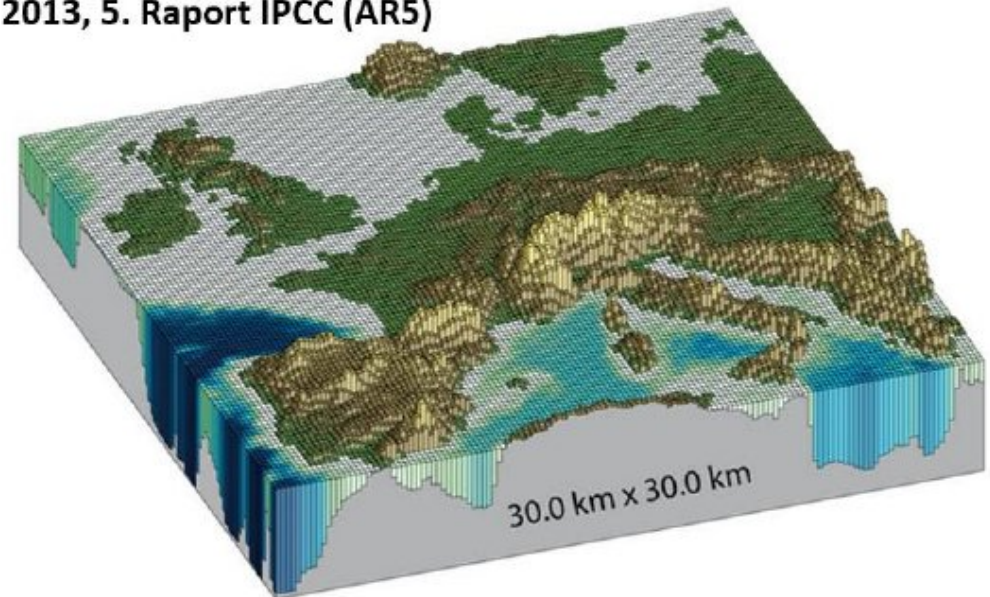
2001, 3. Raport IPCC (TAR)



2007, 4. Raport IPCC (AR4)

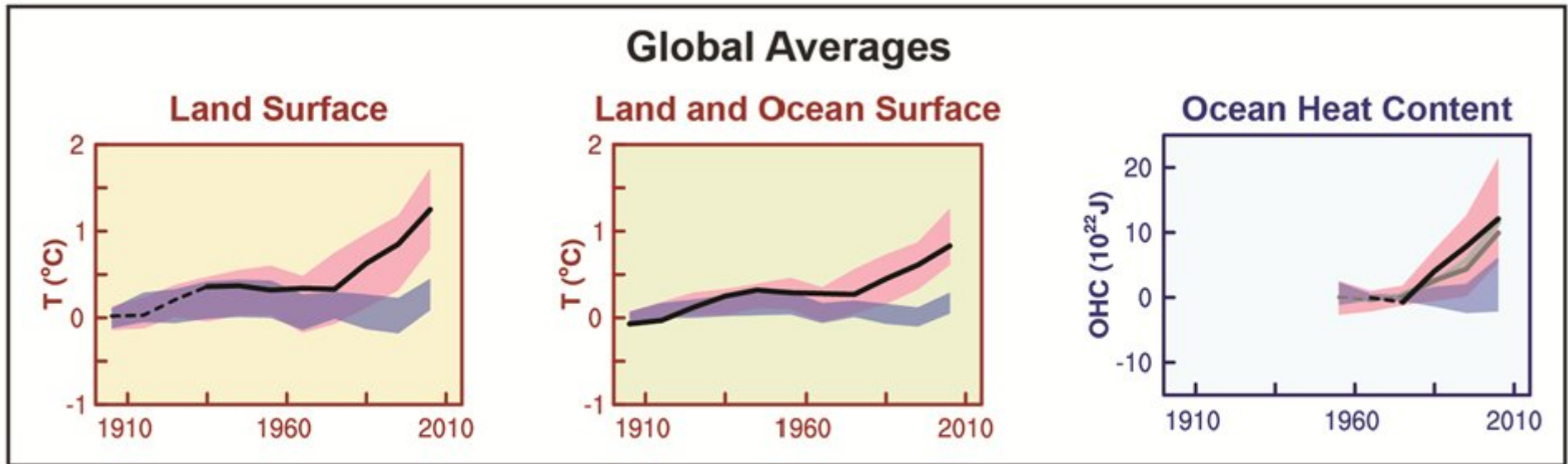


2013, 5. Raport IPCC (AR5)



Rozwój siatek modeli klimatu.

Jest niezwykle prawdopodobne że działalność ludzka jest dominującą przyczyną ocieplenia obserwowanego od lat 50-tych XX wieku.



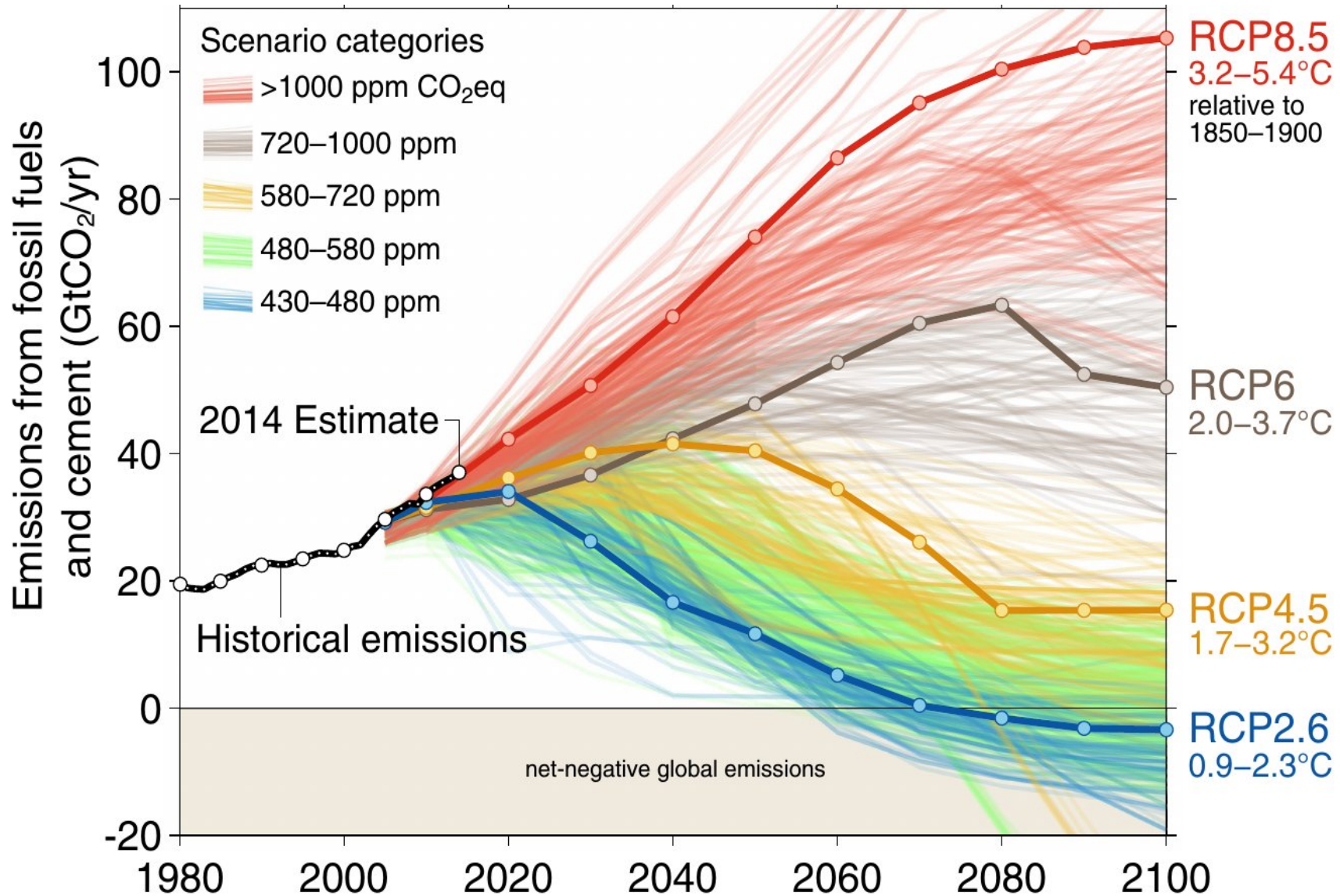
— Observations

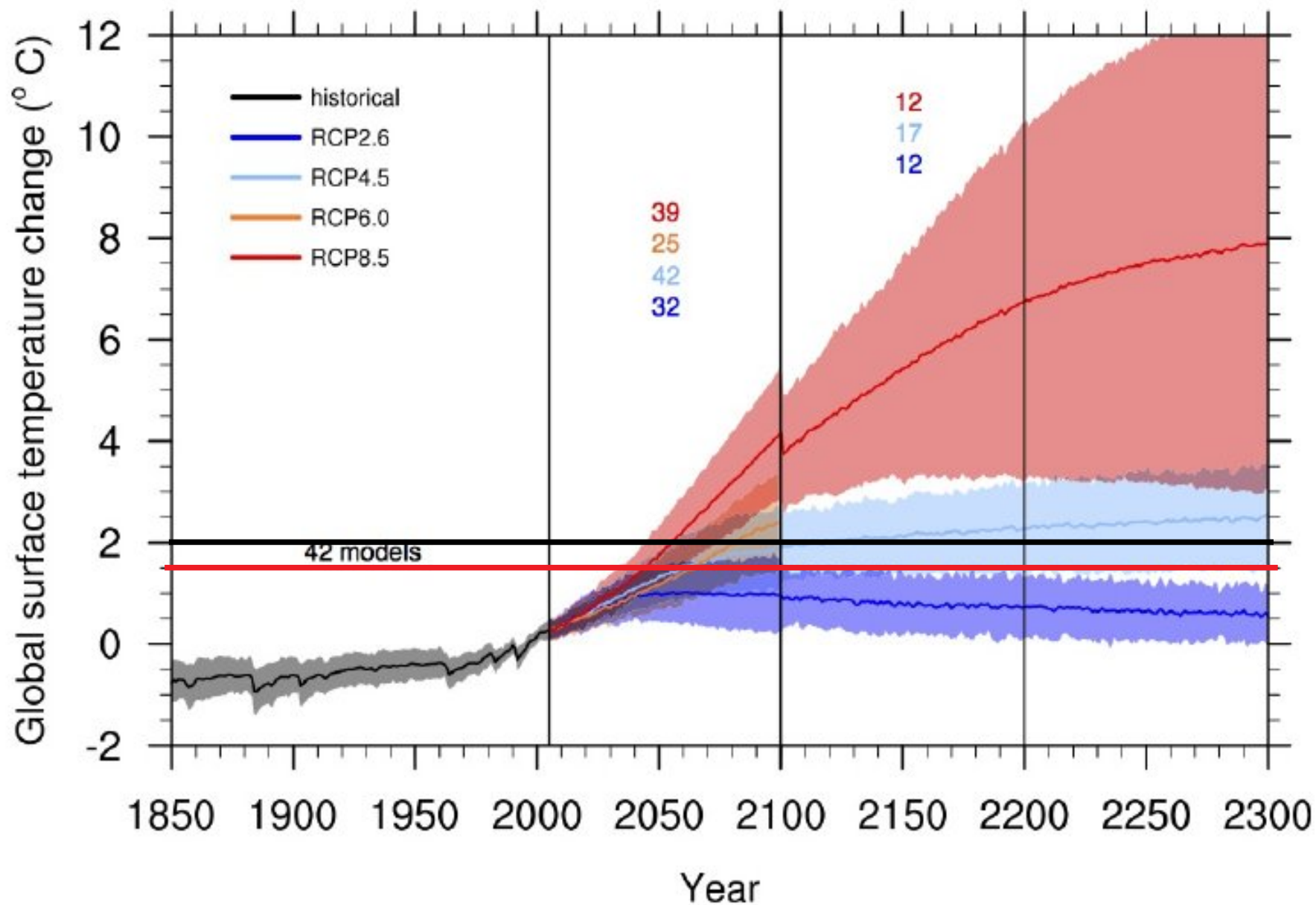
■ Models using only natural forcings

■ Models using both natural and anthropogenic forcings

Obserwowane emisje i scenariusze przyszłych emisji

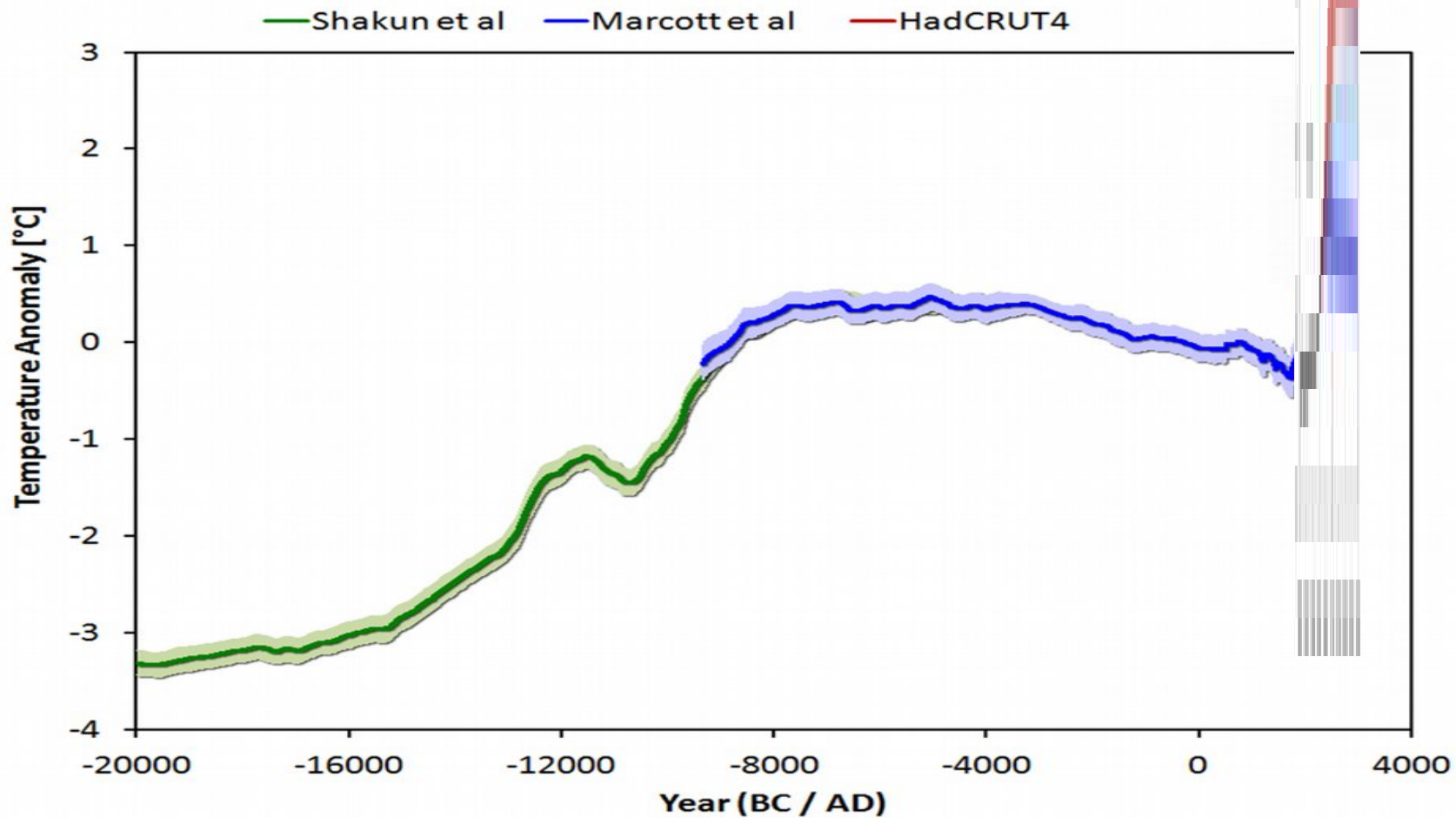
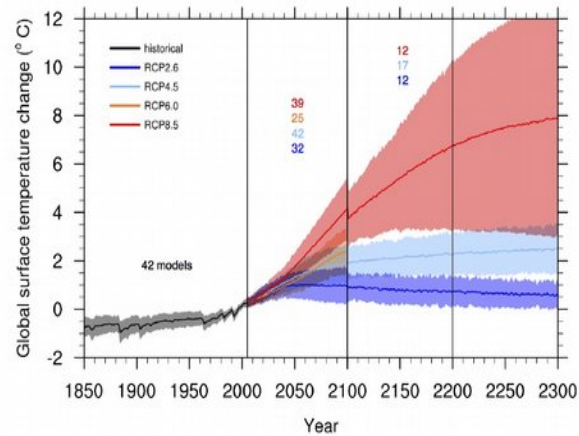
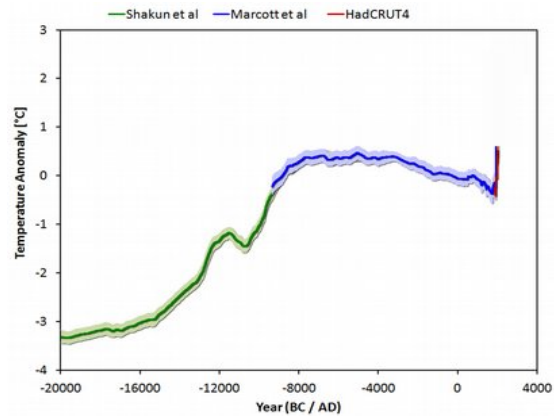
Aktualna ścieżka emisji prowadzi do wzrostu temperatury w roku 2100 o 3.2–5.4°C ponad wartość sprzed ery przemysłowej. Aby utrzymać wzrost temperatury nie większy niż 2°C konieczne są znaczne redukcje emisji.



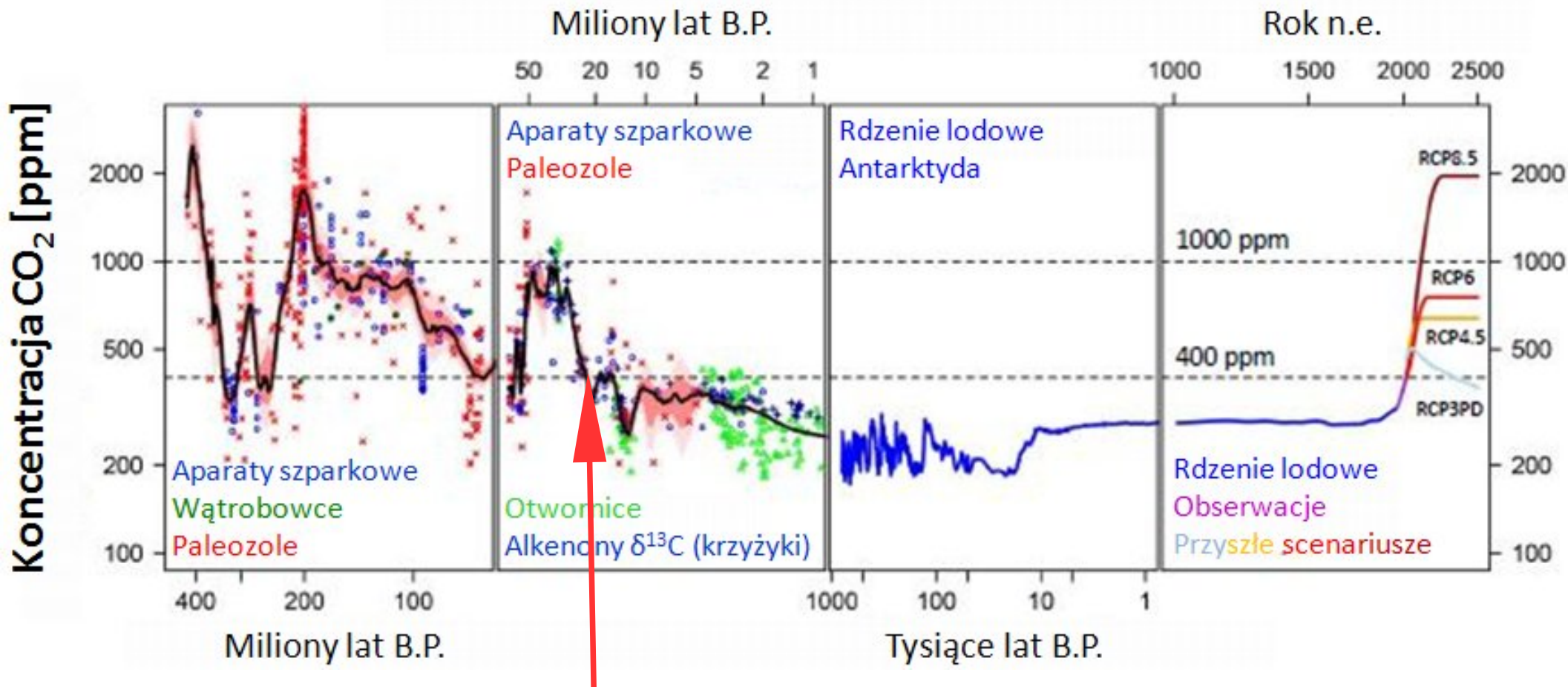


Anomalia średniej temperatury globu do roku 2300 przy różnych scenariuszach emisji

Glacja, Holocen i Antropocen

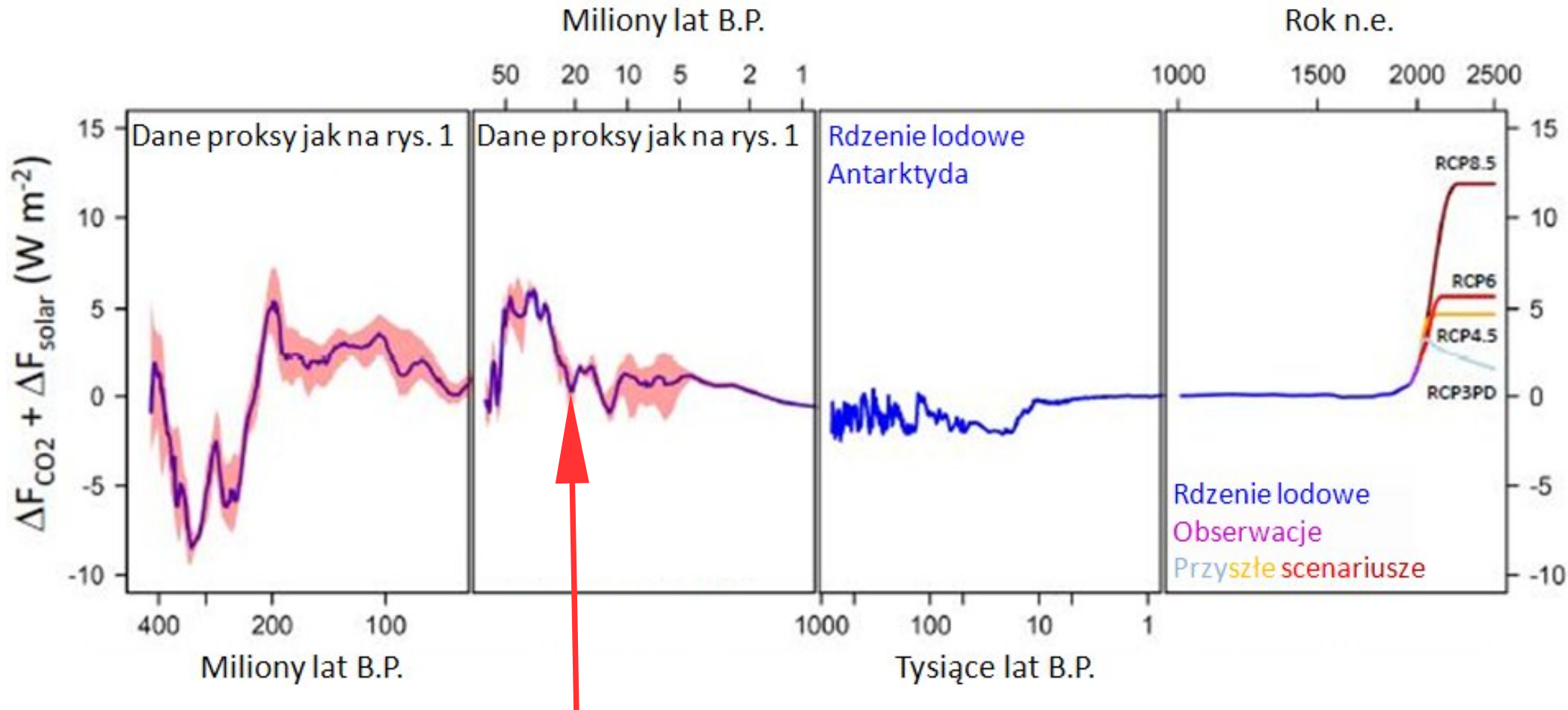


Zmiany koncentracji atmosferycznego CO₂ w historii geologicznej



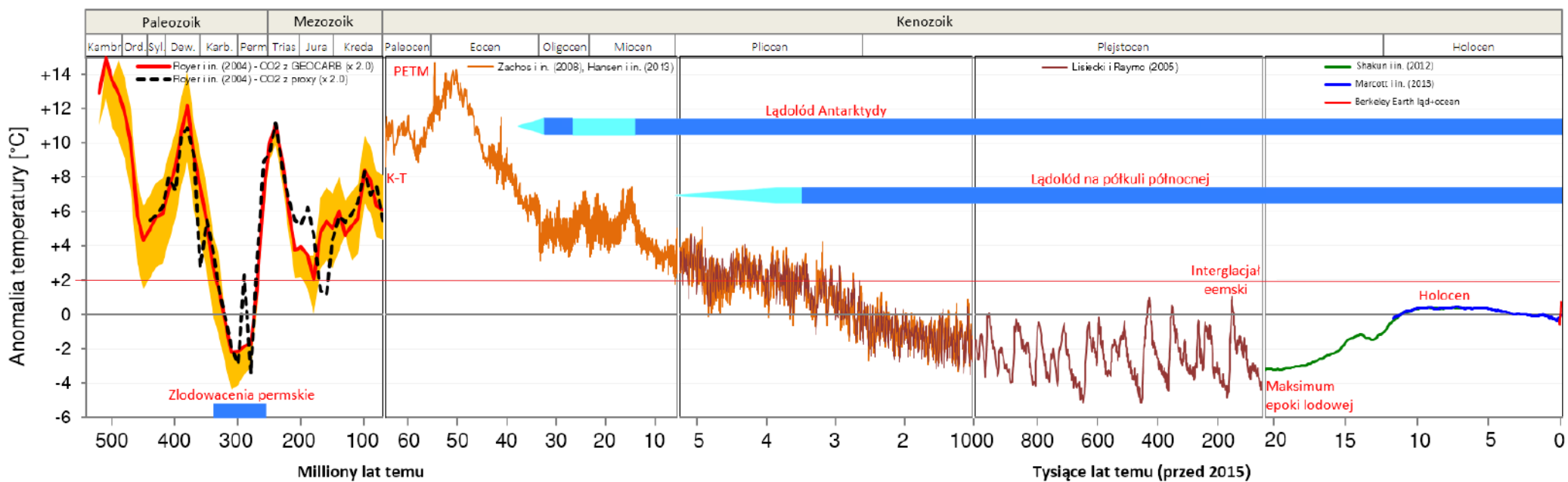
glacjacja Antarktydy

Zmiany wymuszania radiacyjnego (Słońce+CO₂) w historii geologicznej

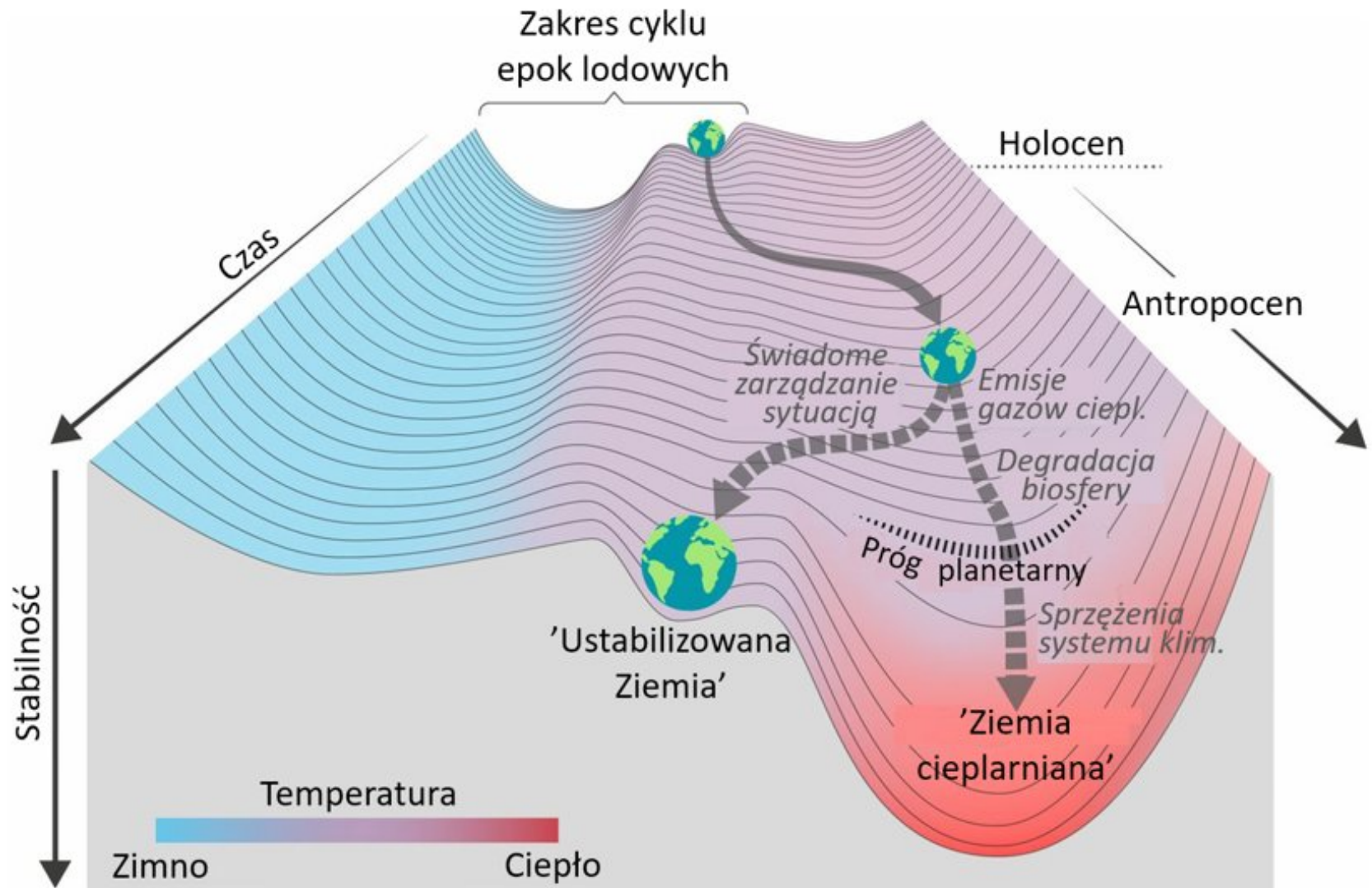


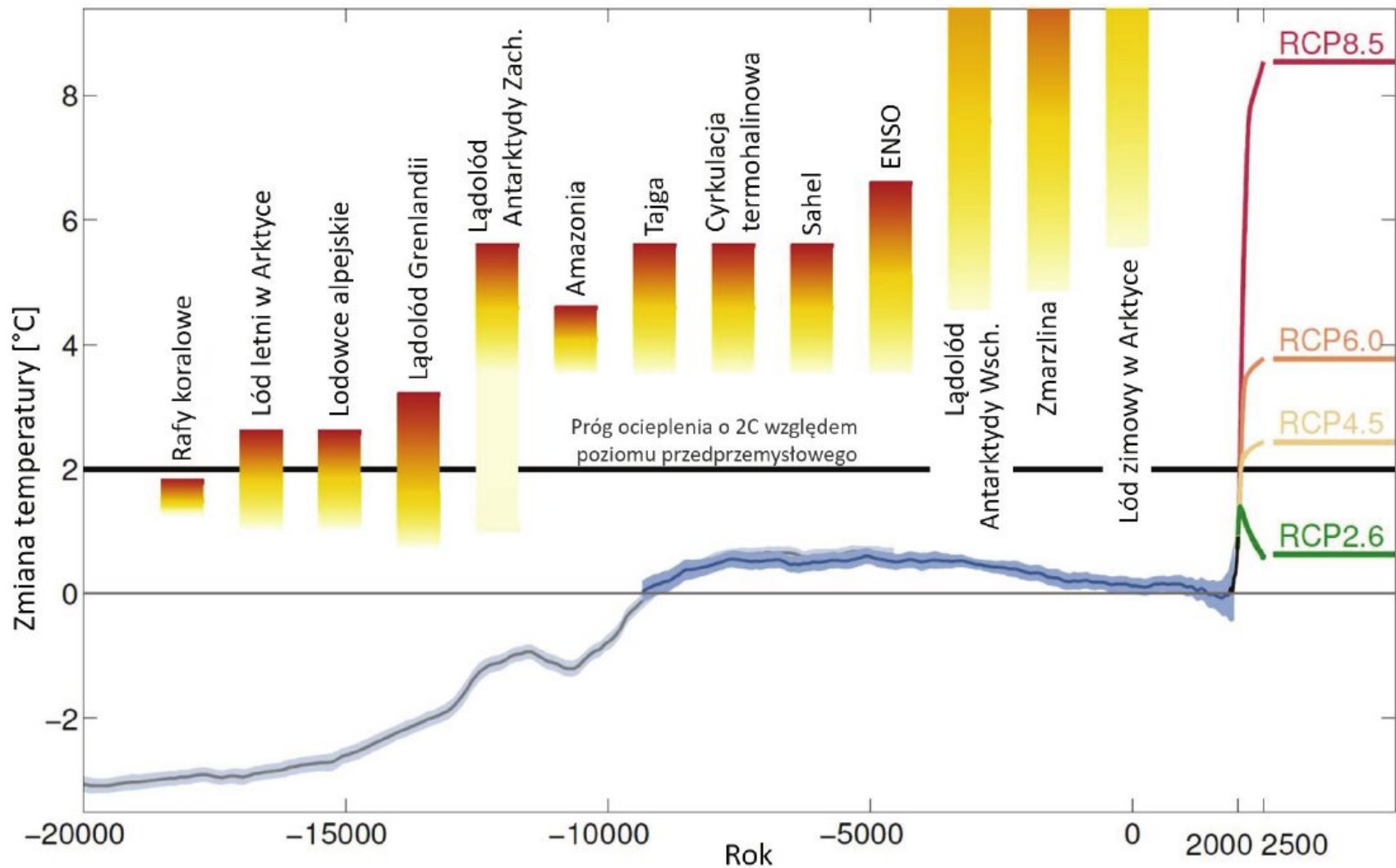
glacjacja Antarktydy

Zmiany temperatury planety w historii geologicznej



Perspektywy na przyszłość



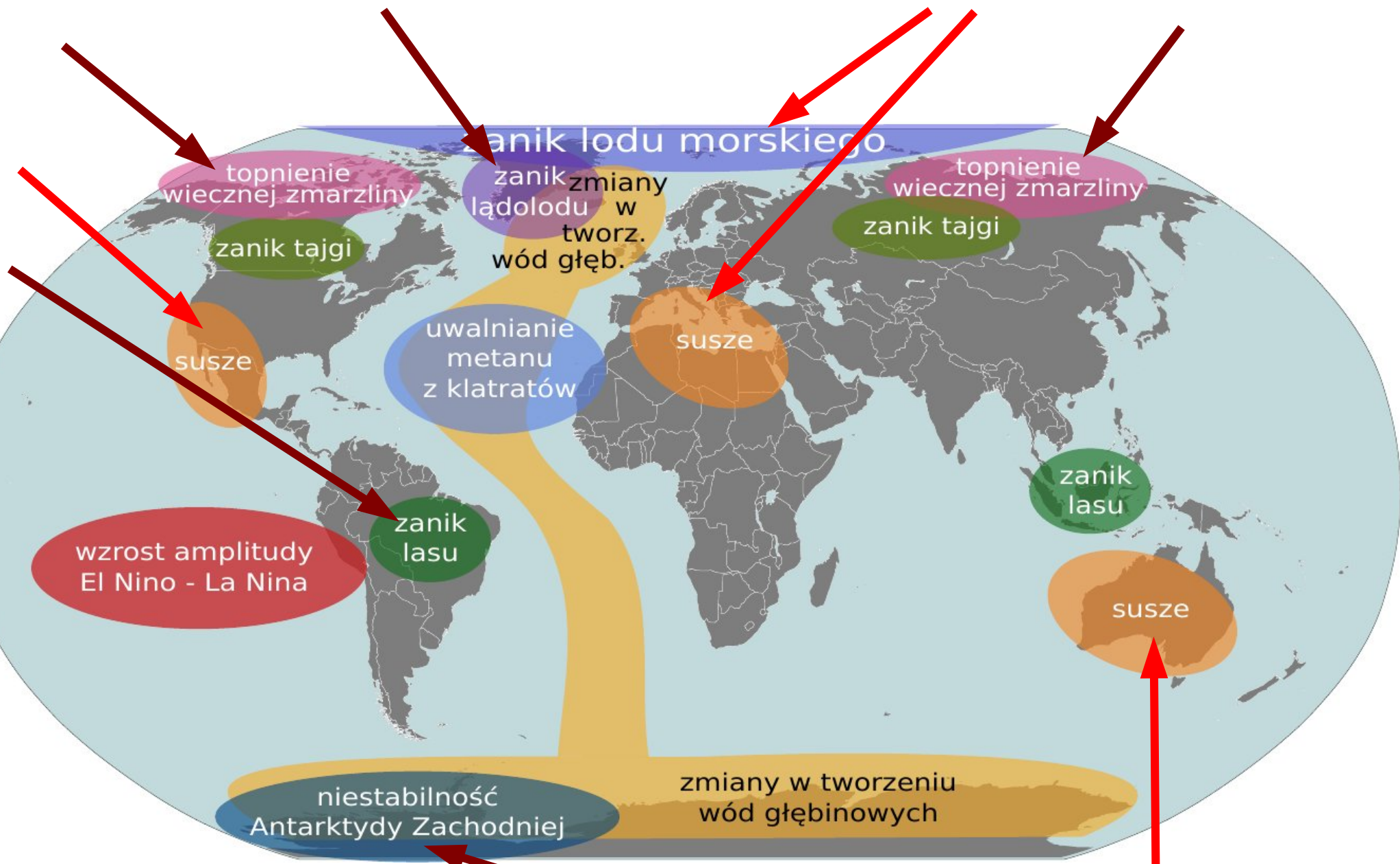


Zmiany średniej temperatury powierzchni Ziemi od ostatniego maksimum epoki lodowej do czasów obecnych wraz ze scenariuszami przyszłej zmiany klimatu.

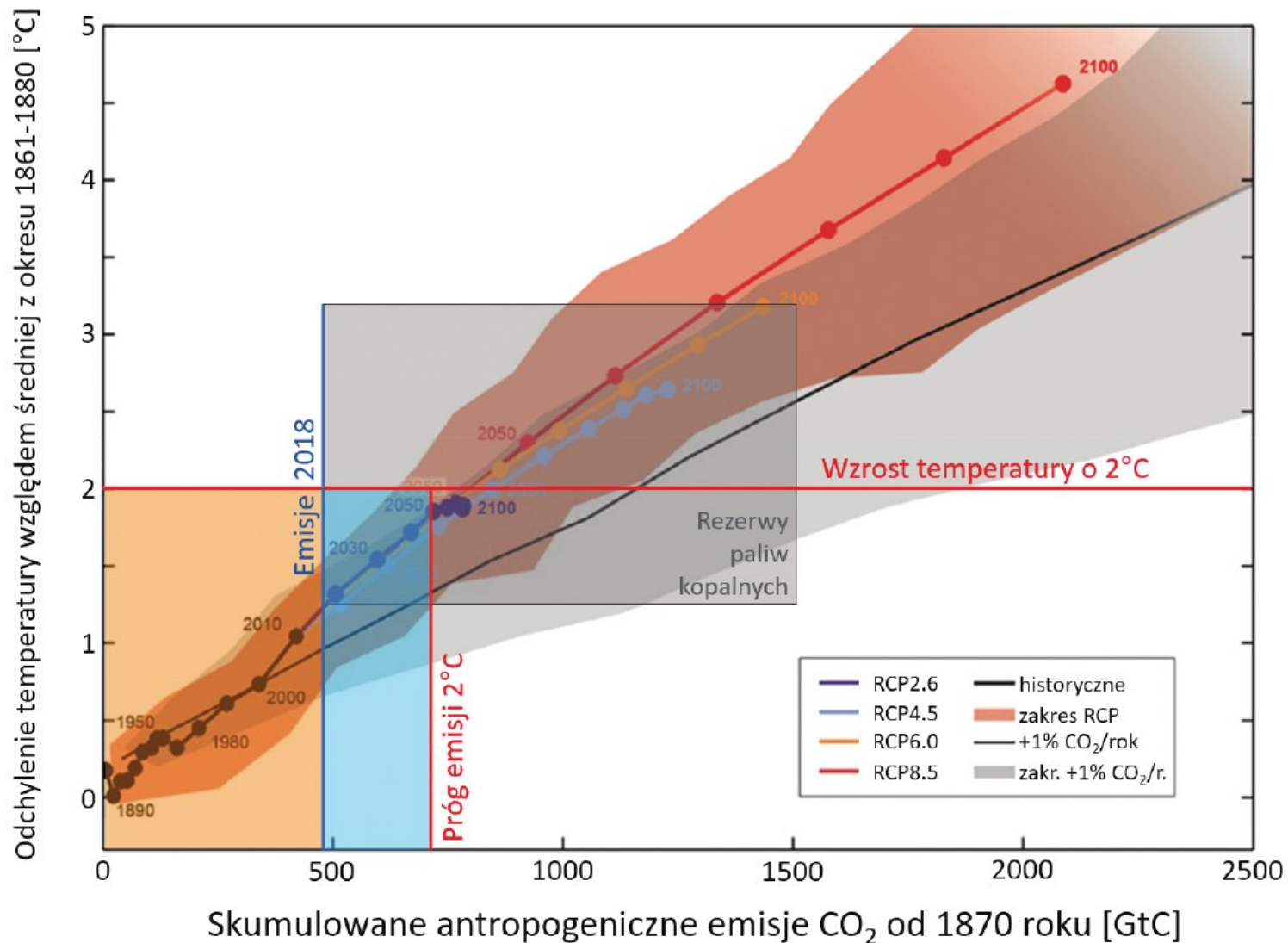
Prostokąty obrazują progi punktów krytycznych ziemskiego systemu klimatycznego – żółty „możliwe”, pomarańczowy „bardzo prawdopodobne”, brązowy „pewne”.

Dolny przedział temperatury oznacza możliwość osiągnięcia punktu krytycznego.

Punkty krytyczne – tipping points – już blisko?



od jakiegoś czasu
prawdopodobnie od teraz

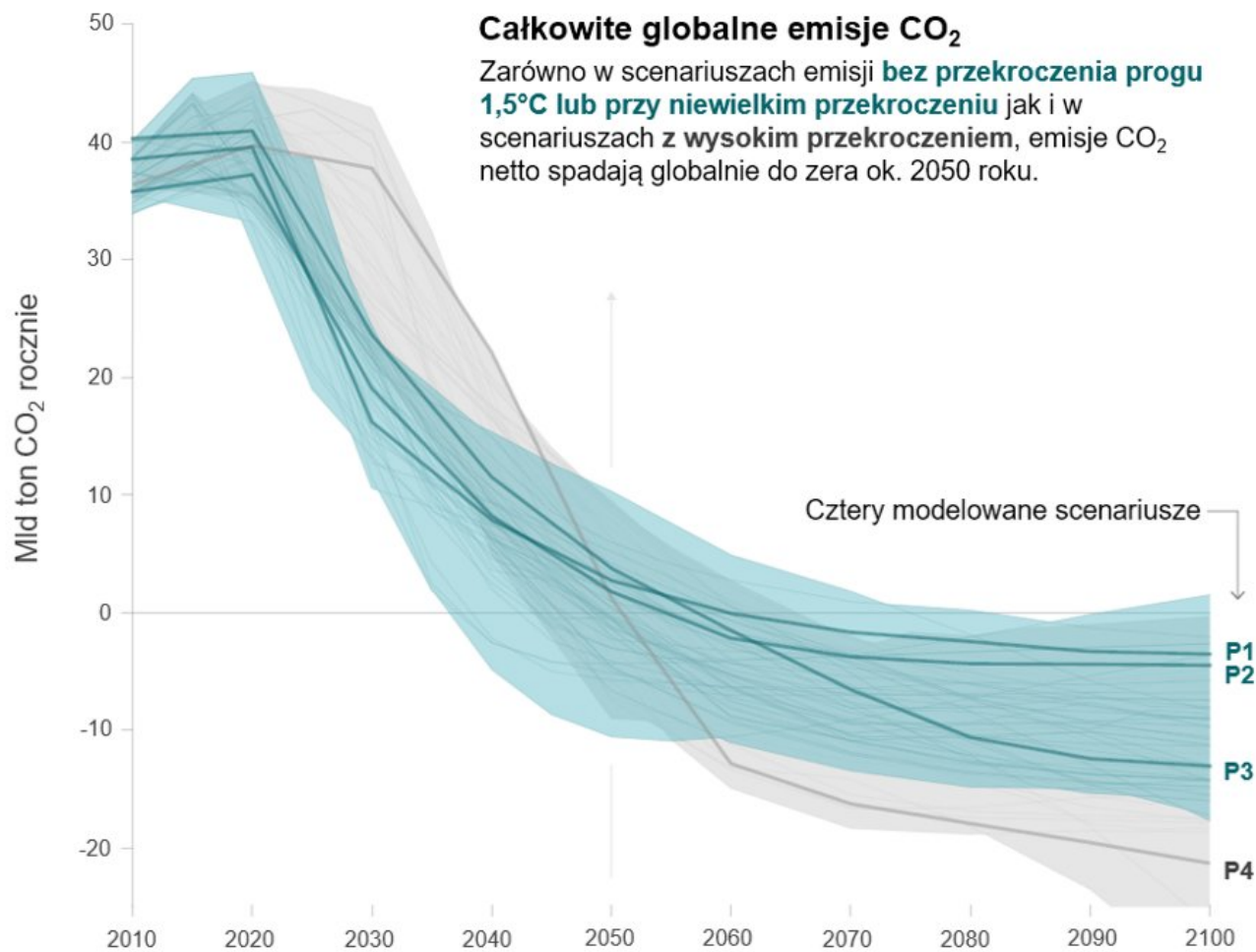


Skumulowane antropogeniczne emisje CO₂ od 1870 roku [GtC]

Zależność między sumarycznymi emisjami CO₂ a wzrostem temperatury. Pozioma czerwona linia – 2°C ocieplenia, pionowa czerwona linia – skumulowane emisje dla >66% prawdopodobieństwa nieprzekroczenia progu 2°C. Obszar niebieski pozostała suma emisji po 2018 roku – budżet węglowy. Aktualne emisje to ok 10 GtC na rok.

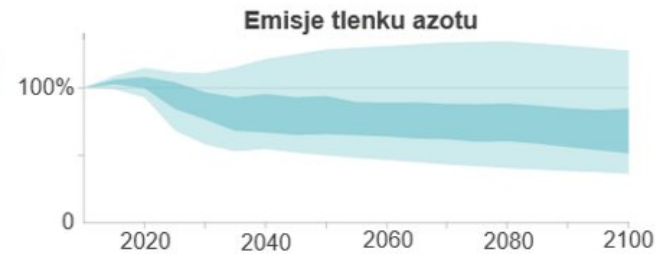
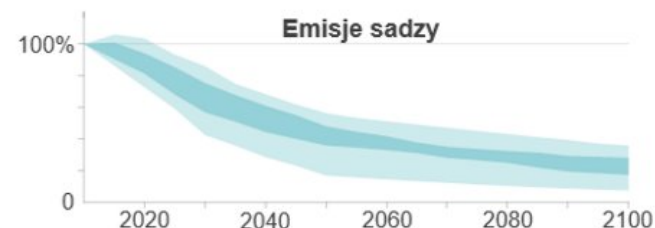
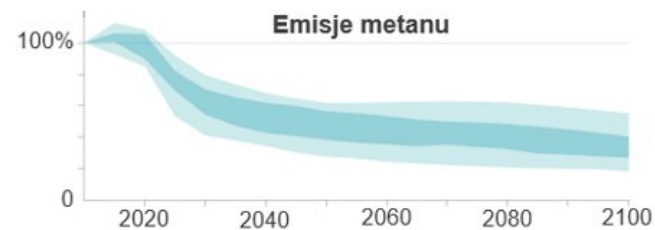
Globalne scenariusze emisji

Ogólna charakterystyka zmian antropogenicznych emisji CO₂ netto oraz emisji metanu, sadzy i tlenku azotu w scenariuszach emisji pozwalających na ograniczenie globalnego ocieplenia o 1,5°C bez przekroczenia tego progu lub z jego niewielkim przekroczeniem. Emisje netto definiowane są jako antropogeniczne emisje pomniejszone o antropogeniczne usuwanie. Redukcja emisji netto może być prowadzona na różne sposoby zilustrowane na rysunku SPM3B.



Inne poza CO₂ emisje względem 2010 roku

Emisje substancji innych niż CO₂ są redukowane także w scenariuszach **bez przekroczenia progu 1,5°C lub przy niewielkim przekroczeniu**, jednak globalnie nie spadają do zera.



Czas spadku emisji CO₂ netto do zera

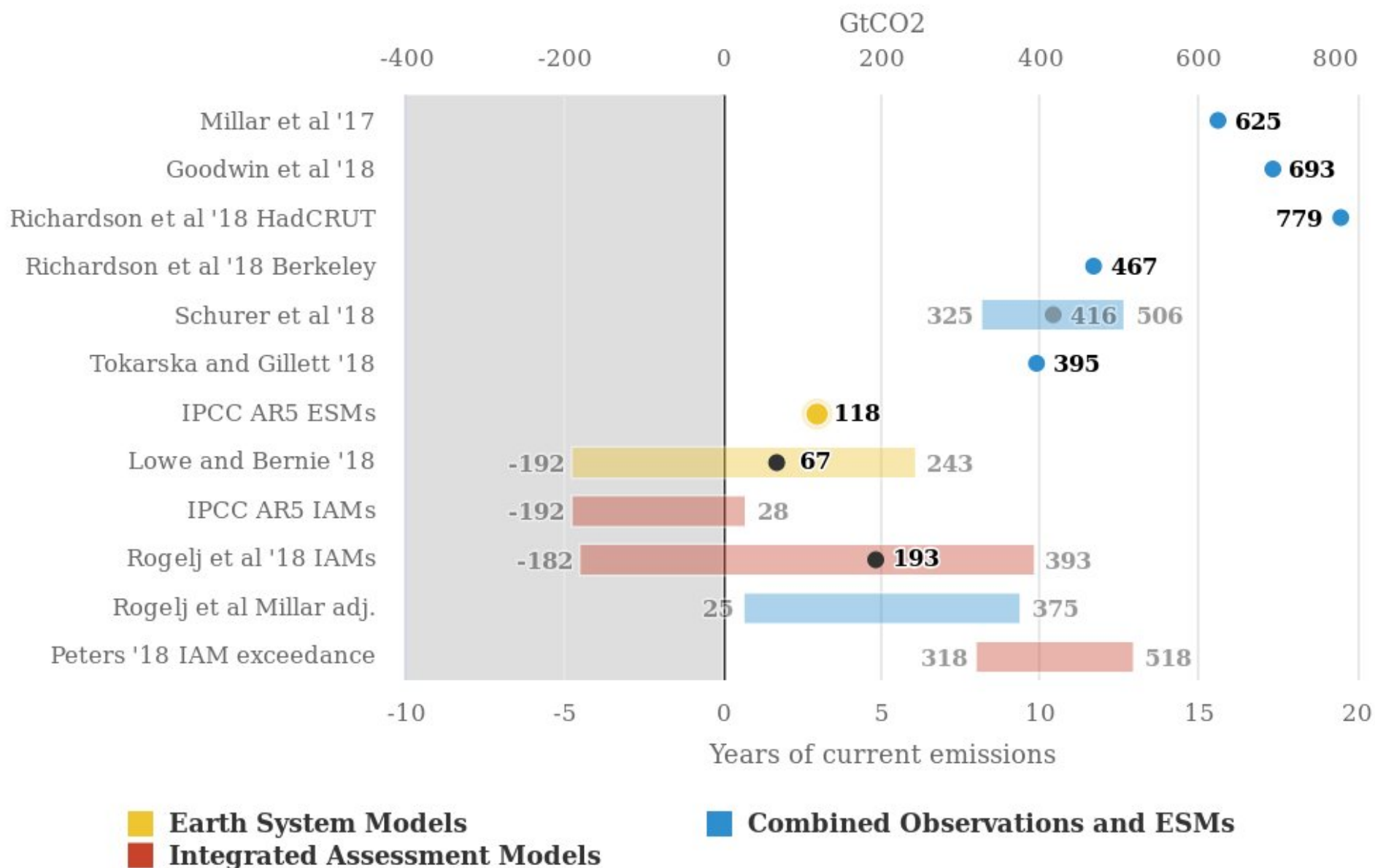
Cienkie linie pokazują: 5-95 percentyl,
po grubione 25-75 percentyl scenariuszy.

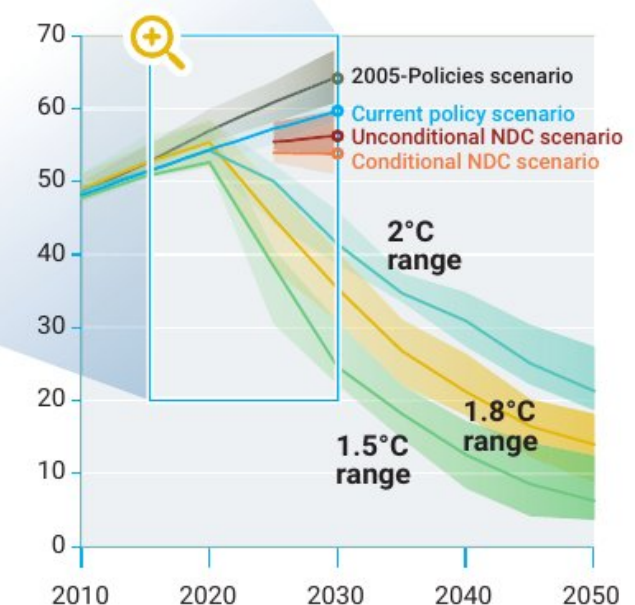
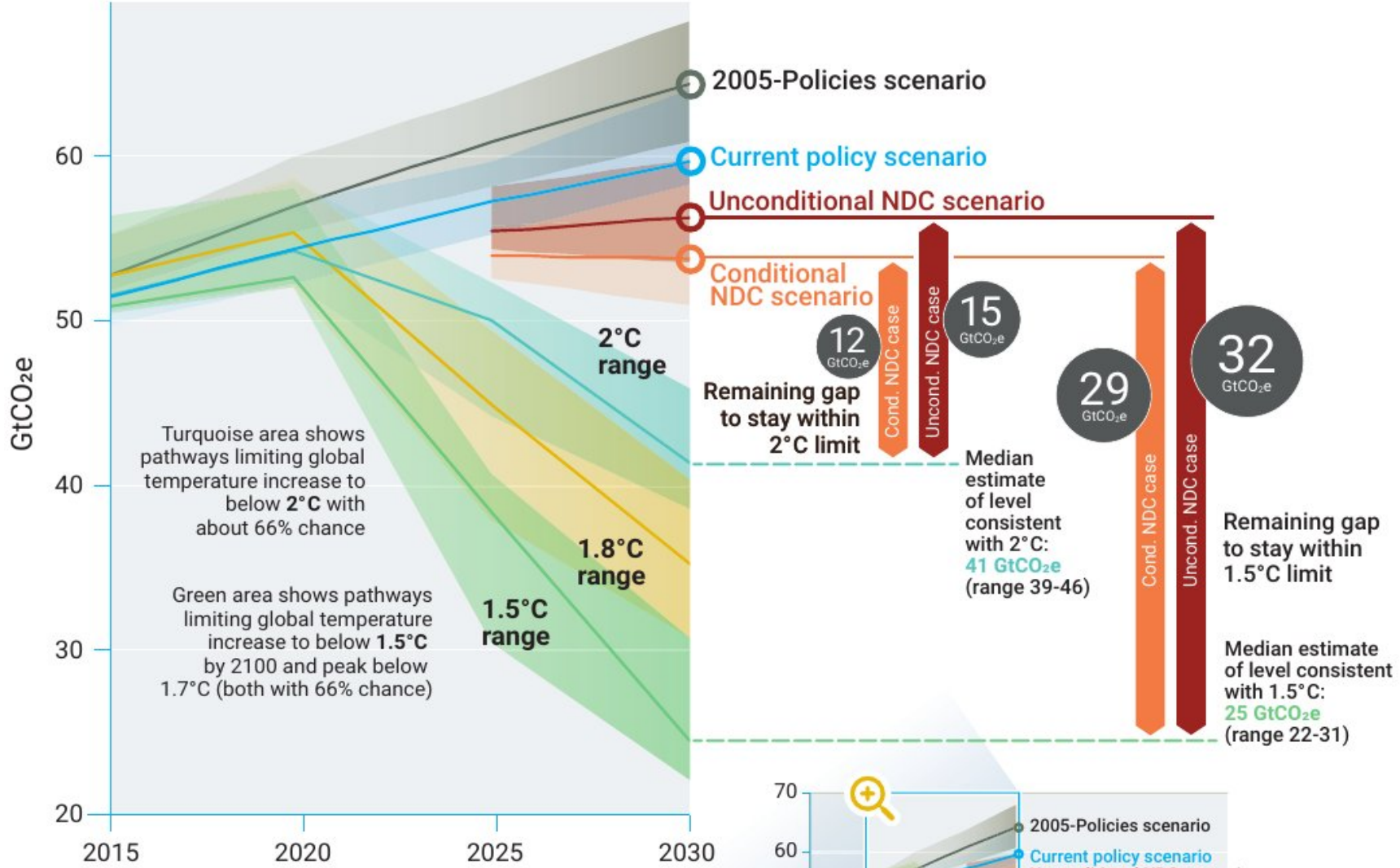


Scenariusze bez przekroczenia progu 1,5°C lub z niewielkim przekroczeniem

Scenariusze z wysokim przekroczeniem progu 1,5°C

Remaining carbon budget for a 66% chance of less than 1.5C warming





Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades

By ROGER REVELLE and HANS E. SUESS, Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, California

(Manuscript received September 4, 1956)

Tellus IX (1957), 1

„I tak ludzkość prowadzi teraz jedyny w swoim rodzaju eksperyment geofizyczny, który nie wydarzył się nigdy w przeszłości ani nie będzie mógł być w przyszłości powtórzony. W ciągu kilku stuleci zwracamy atmosferze i oceanowi węgiel odłożony przez naturę w skałach osadowych w procesie który trwał setki milionów lat.”

Pytanie przed którym dziś stoimy:

czy potrafimy odzyskać kontrolę nad tym eksperymentem?