

# Fizyka Procesów Klimatycznych

## Wykład 3

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

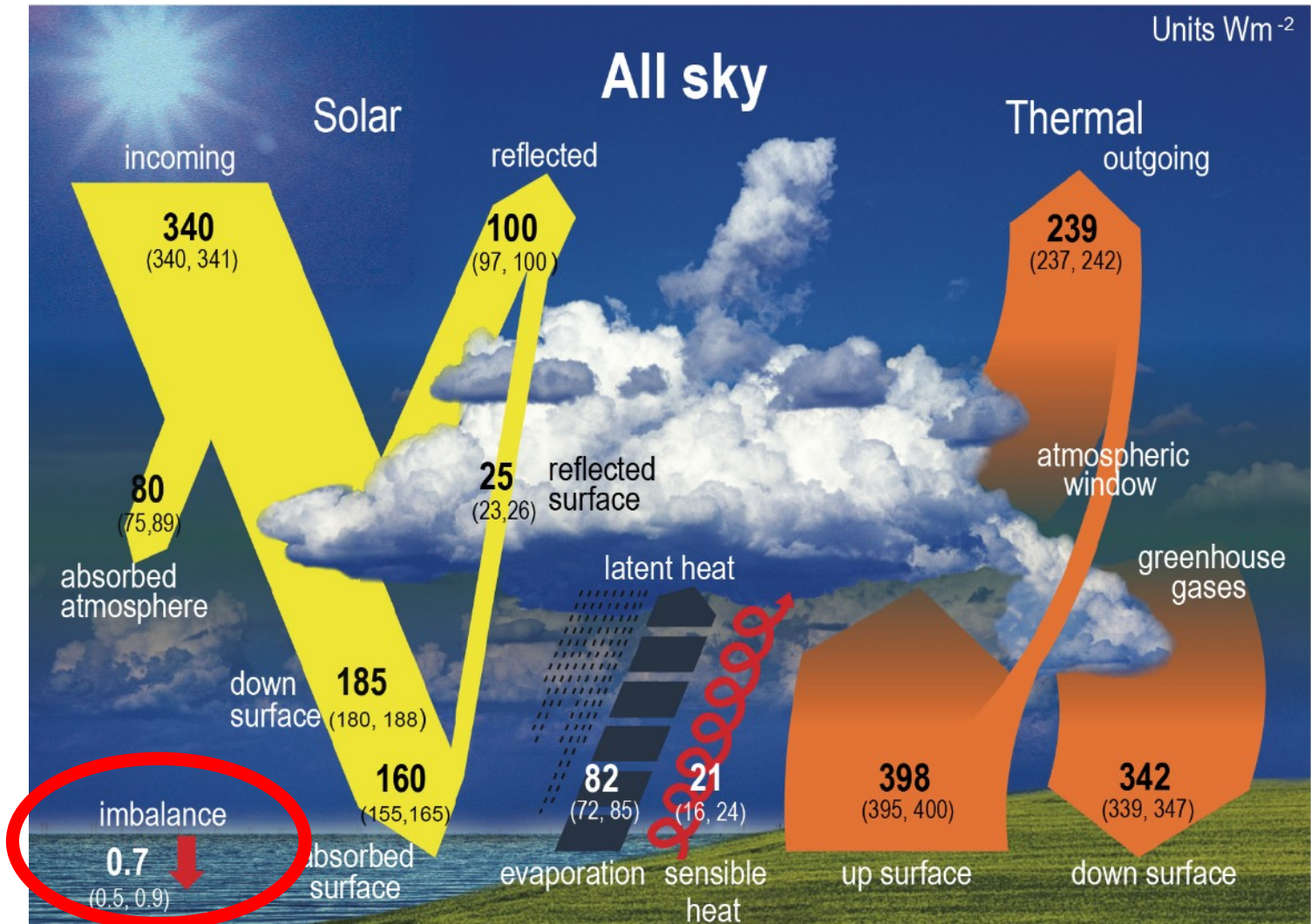
Wykorzystano slajdy dr Aleksandry Kardaś

## **ENERGIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM**

1. Strumień energii słonecznej =  $\frac{1}{4}$  stałej słonecznej  
 $\frac{1}{4} * 1362 \text{W/m}^2 \approx 341 \text{W/m}^2$
2. Albedo Ziemi  $\approx 0.3$ , zmienne, od 0.9 (śnieg) do 0.07 (ocean)
3. Strumień energii geotermalnej  $\approx 0.092 \text{W/m}^2$
4. Strumień energii ze spalania paliw kopalnych  $\approx 0.04 \text{W/m}^2$

## **PODSTAWOWE WŁASNOŚCI SYSTEMU KLIMATYCZNEGO**

1. Ciśnienie powietrza  $\approx 1000 \text{hPa}$  (10m wody),  $c_p = 1004 \text{J/kg} \cdot \text{K}$
2. Średnia głębokość oceanów  $\approx 4000 \text{m}$ ,  $c_w = 4192 \text{J/kg} \cdot \text{K}$
3. Ląd – tylko cienka warstwa odpowiada na strumienie radiacji
4. Gazy cieplarniane:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$  i wiele innych



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

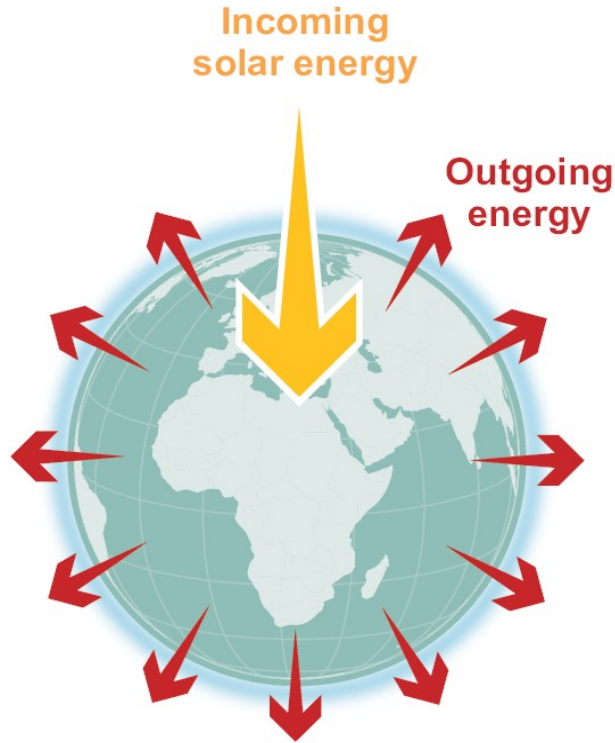
W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-7/figure-7-2/>

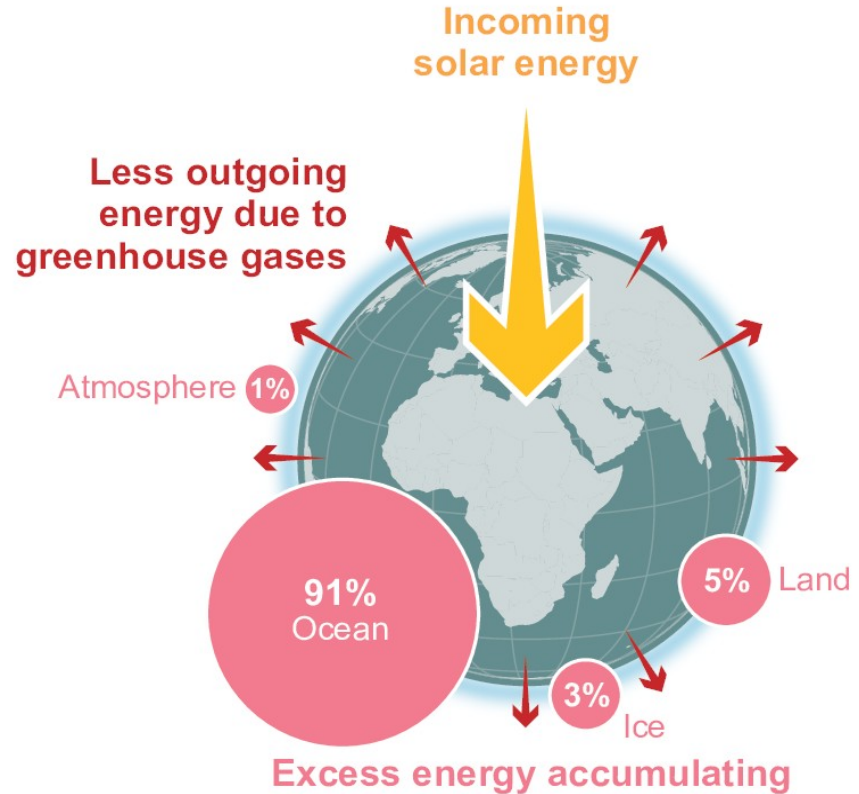
# FAQ 7.1: The Earth's energy budget and climate change

Since at least 1970, there has been a persistent imbalance in the energy flows that has led to **excess energy being absorbed by different components of the climate system.**

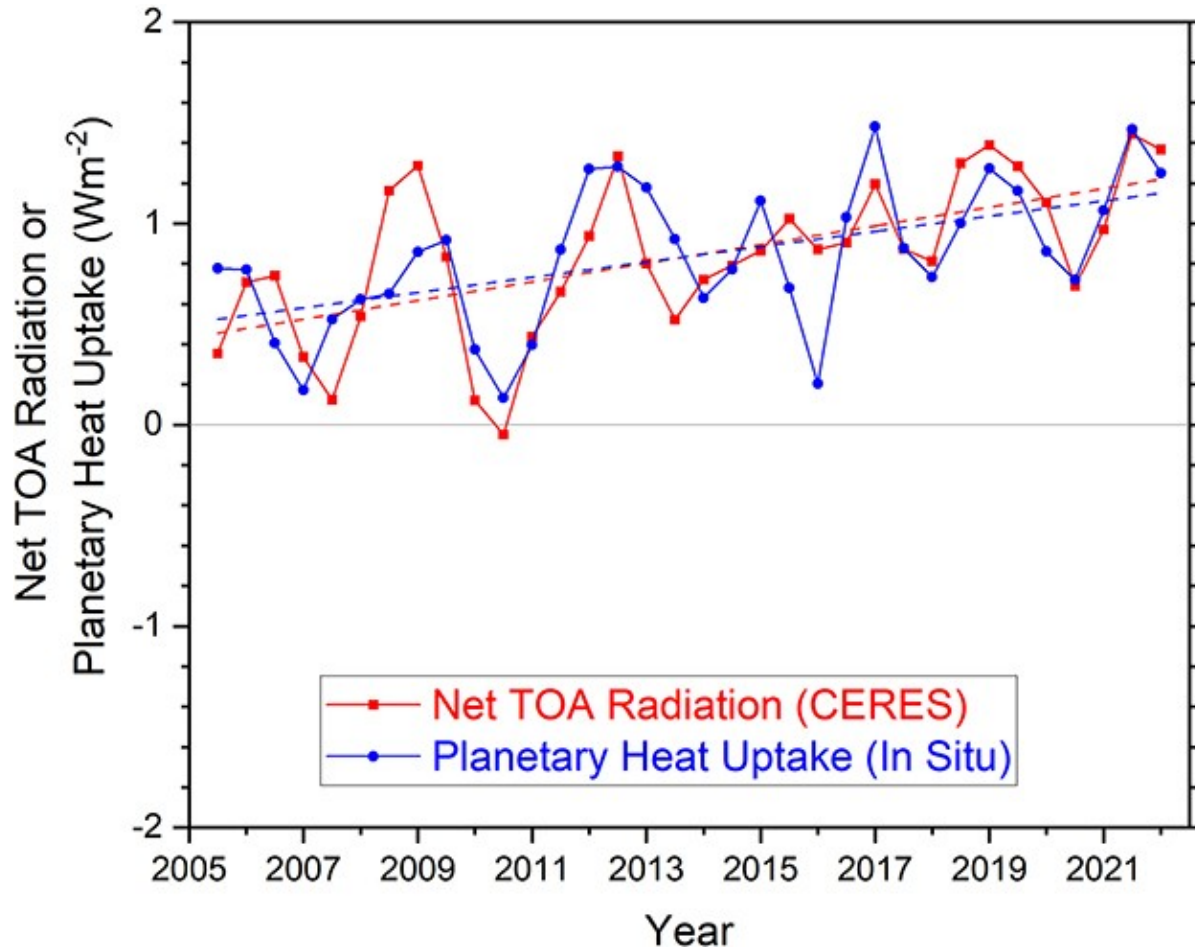
## Stable climate: in balance



## Today: imbalanced

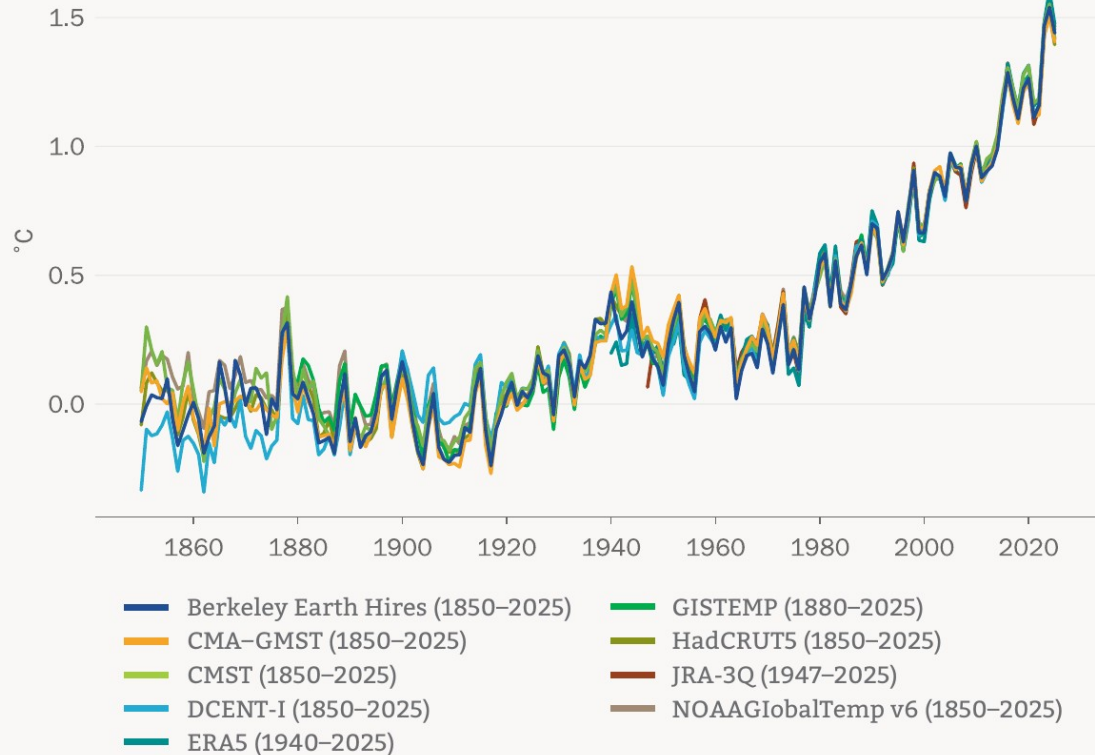


# Nierównowaga energetyczna narasta



Schmidt GA, et al., 2023, CERESMIP: a climate modeling protocol to investigate recent trends in the Earth's Energy Imbalance. *Front. Clim.* 5:1202161. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1202161>

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

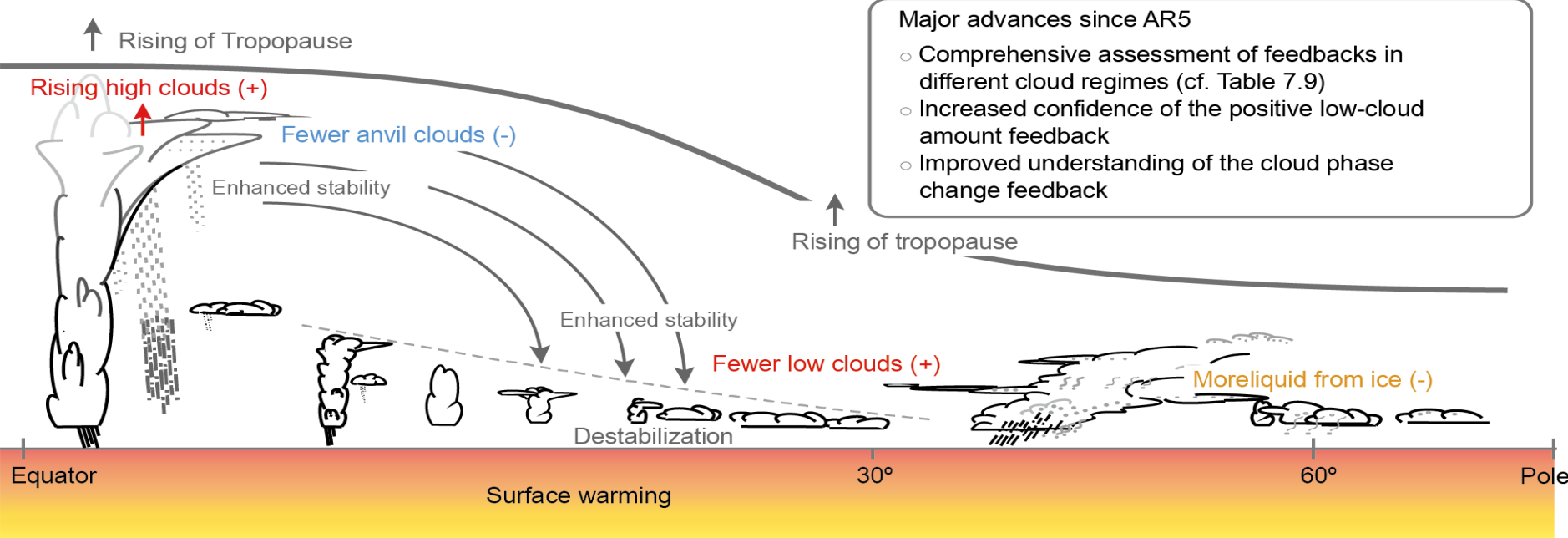


**Figure 2.** Annual global mean temperature anomalies relative to a pre-industrial (1850–1900) baseline shown from 1850 to 2025

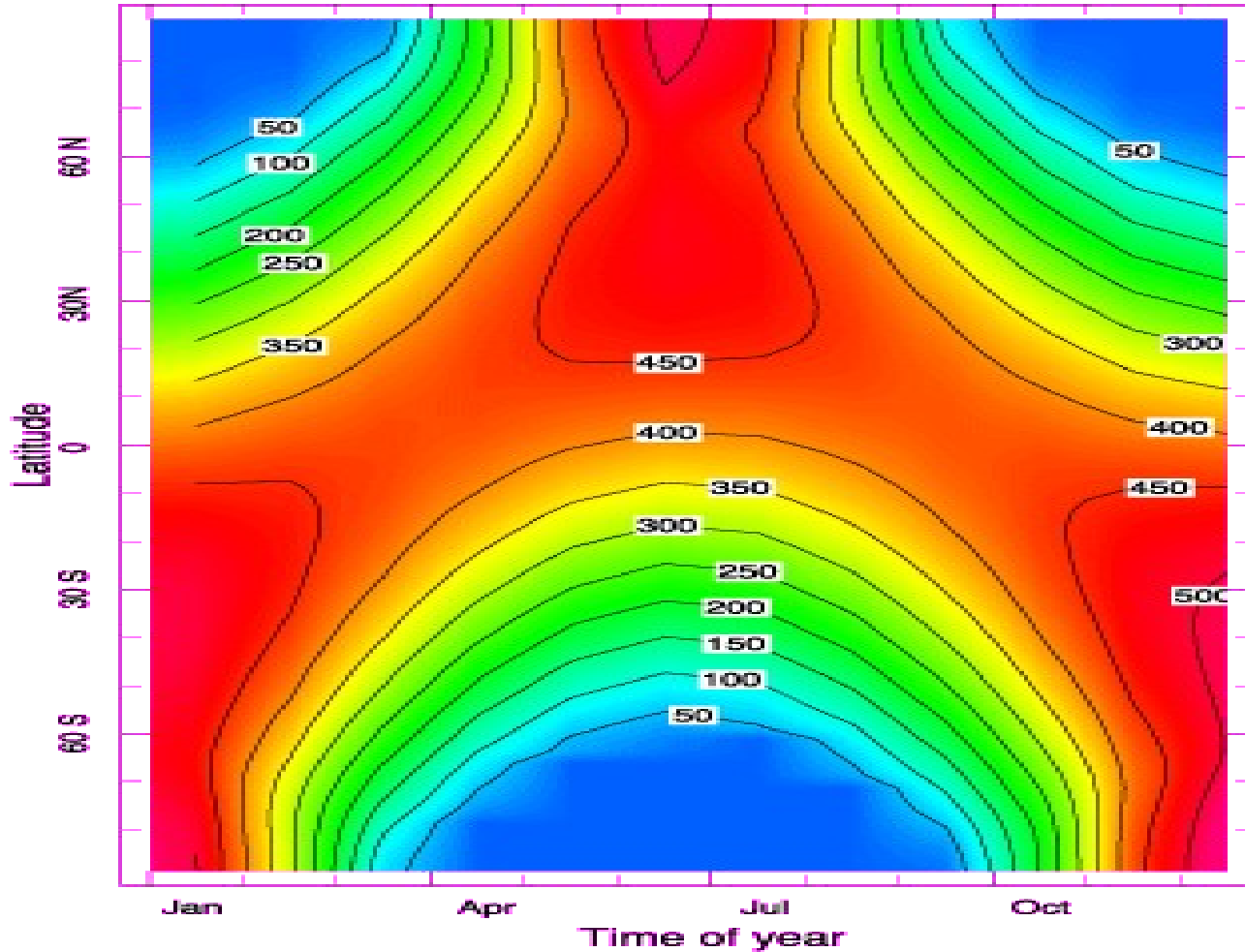
Source: Data are from the datasets indicated in the legend. For details see Datasets and methods.

Zmiany temperatury  
powierzchni Ziemi od 1850

# Zmiany w bilansie radiacyjnym wpływają na dynamikę atmosfery i oceanu.



## Latitude-Time Distribution of Incoming Solar Radiation at the Top of the Atmosphere



Based on ERBE data. Units are  $W/m^2$

Zmienność w dopływie energii słonecznej w cyklu rocznym w funkcji szerokości geograficznej.

## Problem nachylenia osi:

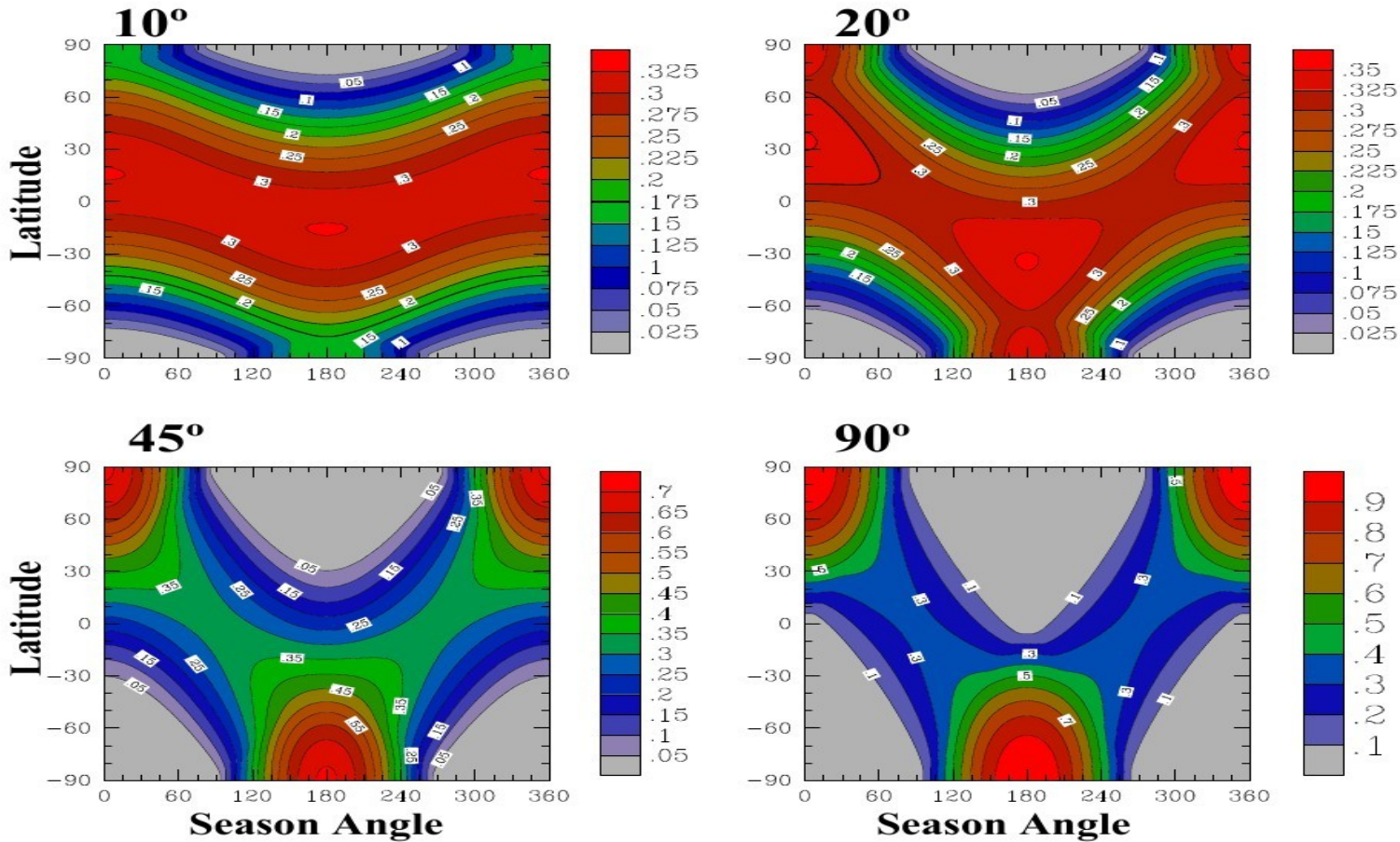


Fig. 7.5: The seasonal and latitudinal distribution of daily-mean flux factor for four different values of the obliquity. In these plots, a circular orbit has been assumed. To obtain the daily mean energy flux incident on each square meter of the planet's surface, one multiplies the flux factor by the solar constant. For example, if the solar constant is  $1000\text{W/m}^2$ , the incident solar flux at the pole during the Summer solstice is about  $700\text{W/m}^2$  if the obliquity is  $45^\circ$  (Diarrohubert, Principles of planetary climato")

# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO <sub>2</sub> (ppm)	<input type="text" value="425"/>
CH <sub>4</sub> (ppm)	<input type="text" value="2"/>
Trop. Ozone (ppb)	<input type="text" value="28"/>
Strat. Ozone scale	<input type="text" value="1"/>
Water Vapor Scale	<input type="text" value="1"/>
Freon Scale	<input type="text" value="1"/>

Temperature Offset, C	<input type="text" value="0"/>
-----------------------	--------------------------------

Locality	<input type="text" value="Tropical Atmosphere"/>
	<input type="text" value="No Clouds or Rain"/>

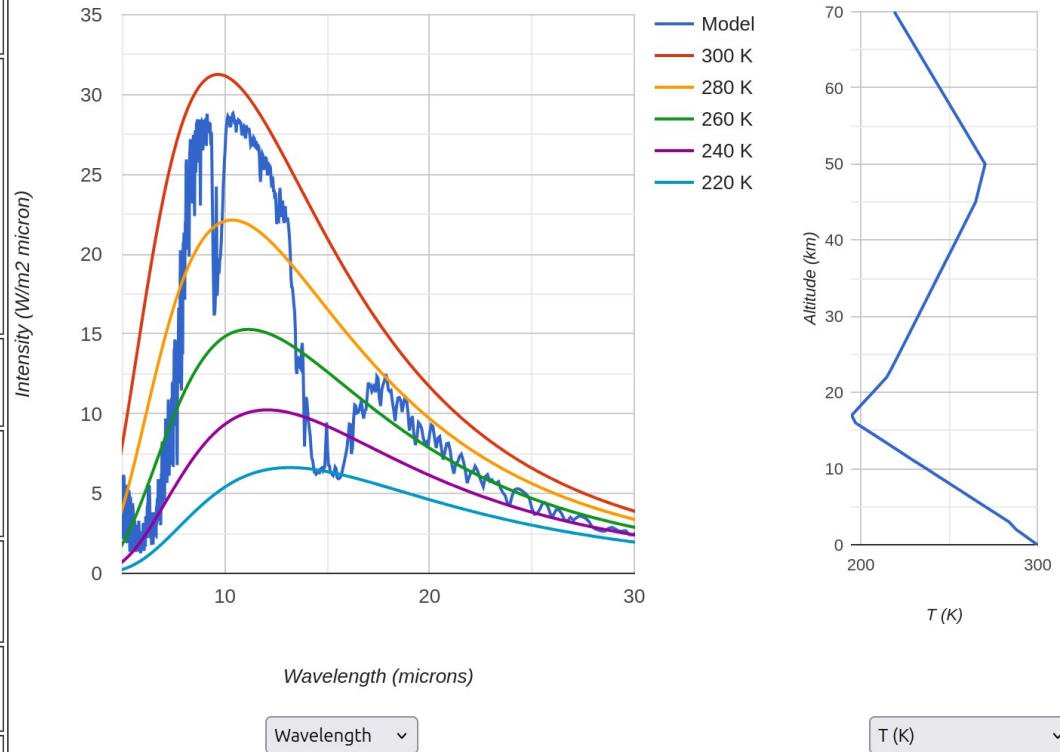
Altitude (km)	<input type="text" value="100"/>
	<input type="text" value="Looking down"/>

## Model Output

Upward IR Heat Flux **297.986** W/m<sup>2</sup>

Ground Temperature **299.7** K

*Spectrum expanded 5-11-17, changing the IR out value.*



# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO <sub>2</sub> (ppm)	<input type="text" value="425"/>
CH <sub>4</sub> (ppm)	<input type="text" value="2"/>
Trop. Ozone (ppb)	<input type="text" value="28"/>
Strat. Ozone scale	<input type="text" value="1"/>
Water Vapor Scale	<input type="text" value="1"/>
Freon Scale	<input type="text" value="1"/>

Temperature Offset, C	<input type="text" value="0"/>
-----------------------	--------------------------------

Locality	<input type="text" value="Midlatitude Winter"/>
	<input type="text" value="No Clouds or Rain"/>

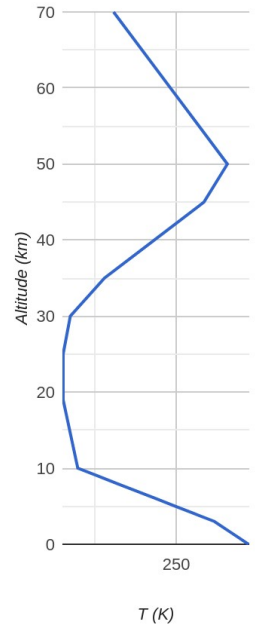
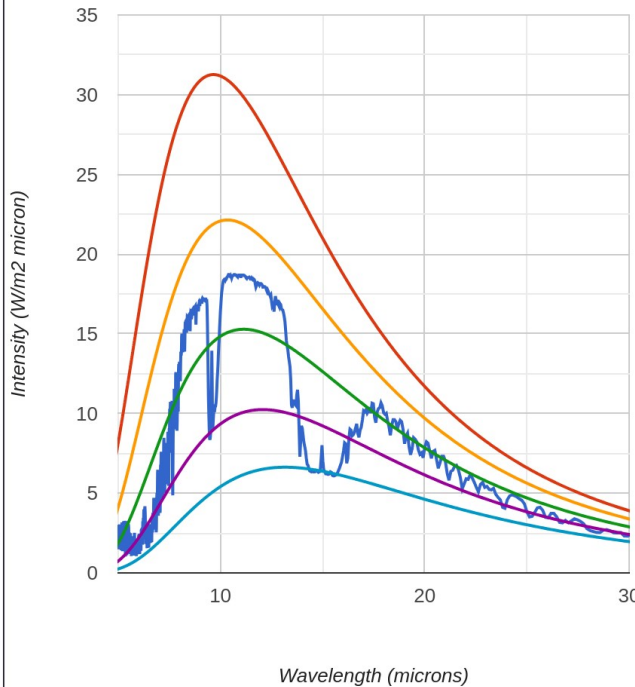
Altitude (km)	<input type="text" value="100"/>
	<input type="text" value="Looking down"/>

<input type="button" value="Save This Run to Background"/>
<input type="button" value="Show Raw Model Output"/>

## Model Output

Upward IR Heat Flux **234.872** W/m<sup>2</sup>  
Ground Temperature **272.2** K

*Spectrum expanded 5-11-17, changing the IR out value.*



# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO <sub>2</sub> (ppm)	<input type="text" value="425"/>
CH <sub>4</sub> (ppm)	<input type="text" value="2"/>
Trop. Ozone (ppb)	<input type="text" value="28"/>
Strat. Ozone scale	<input type="text" value="1"/>
Water Vapor Scale	<input type="text" value="1"/>
Freon Scale	<input type="text" value="1"/>

Temperature Offset, C	<input type="text" value="0"/>
-----------------------	--------------------------------

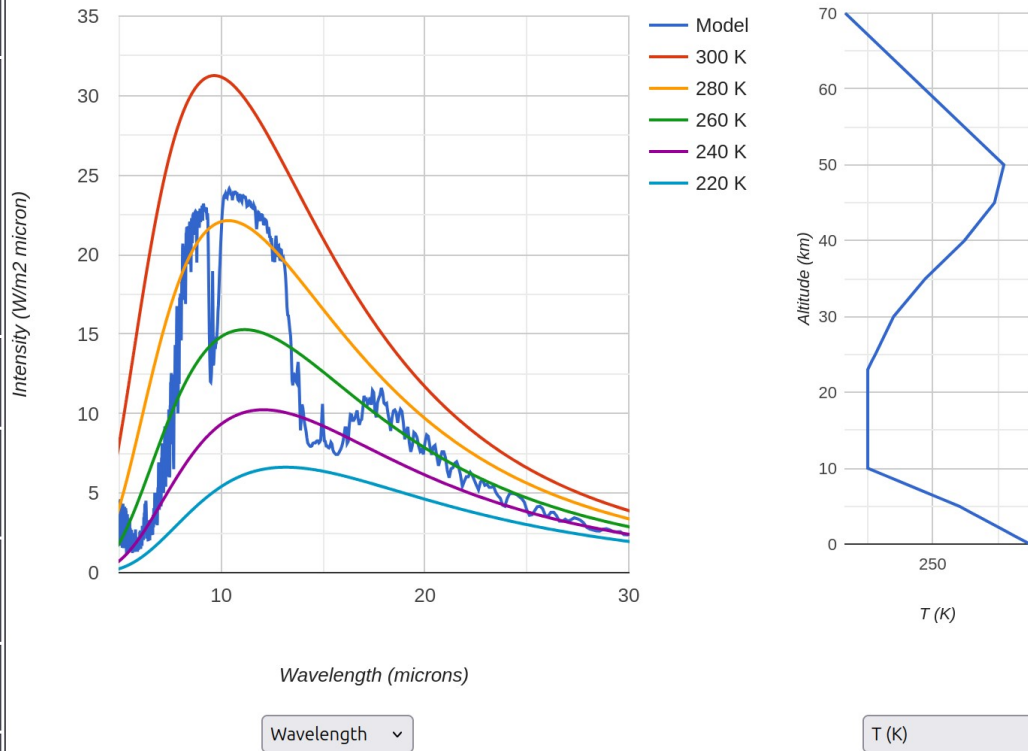
Locality	<input type="text" value="Subarctic Summer"/>
	<input type="text" value="No Clouds or Rain"/>

Altitude (km)	<input type="text" value="100"/>
	<input type="text" value="Looking down"/>

## Model Output

Upward IR Heat Flux **270.323** W/m<sup>2</sup>  
Ground Temperature **287.2** K

*Spectrum expanded 5-11-17, changing the IR out value.*



# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO <sub>2</sub> (ppm)	<input type="text" value="425"/>
CH <sub>4</sub> (ppm)	<input type="text" value="2"/>
Trop. Ozone (ppb)	<input type="text" value="28"/>
Strat. Ozone scale	<input type="text" value="1"/>
Water Vapor Scale	<input type="text" value="1"/>
Freon Scale	<input type="text" value="1"/>

Temperature Offset, C

Locality

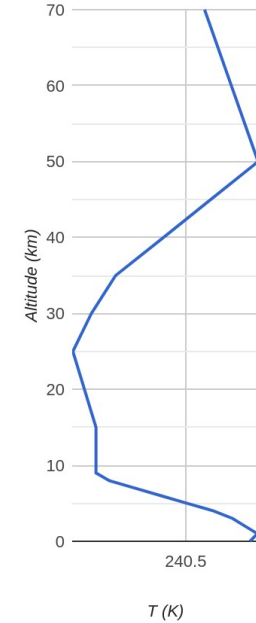
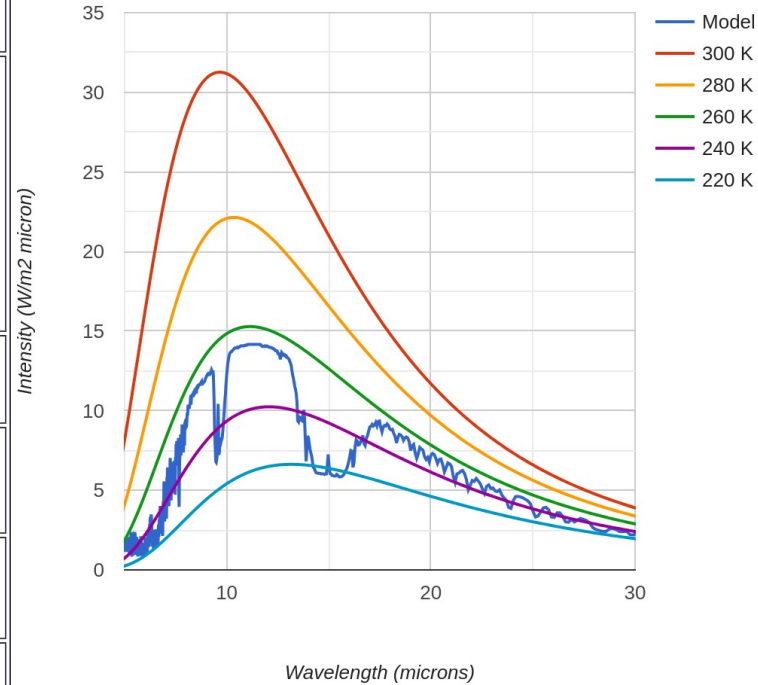
Altitude (km)

## Model Output

Upward IR Heat Flux **201.808** W/m<sup>2</sup>

Ground Temperature **257.2** K

*Spectrum expanded 5-11-17, changing the IR out value.*

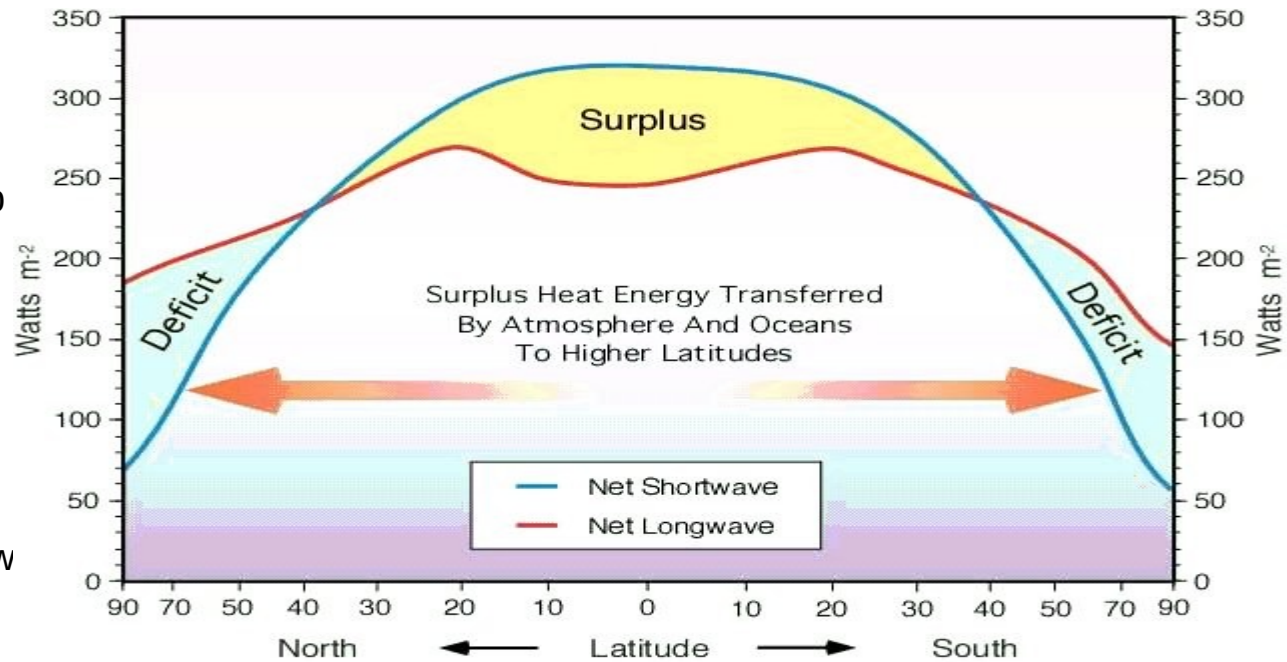


Bilans promieniowania - dopływu i odpływu ciepła – w skali całej planety w stanie stacjonarnym jest bliski równowagi.

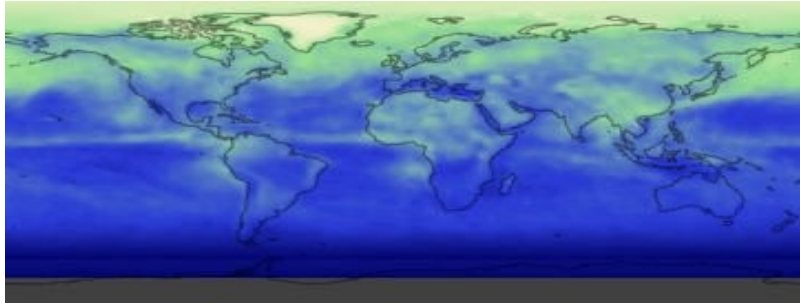
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

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 cieplne w głąb gruntu).

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



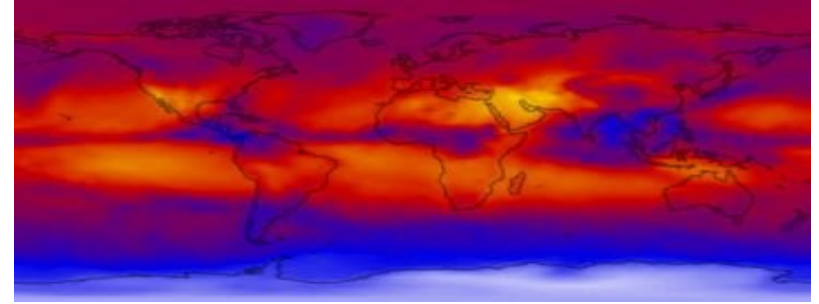
Bilans promieniowania słonecznego i podczerwonego w zależności od szerokości geograficznej. Tam gdzie występuje nadwyżka (Surplus) promieniowania słonecznego planeta ogrzewa się (średnio) wskutek pochłaniania promieniowania. Tam gdzie przeważa emisja promieniowania podczerwonego (Deficit), przeważa chłodzenie.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



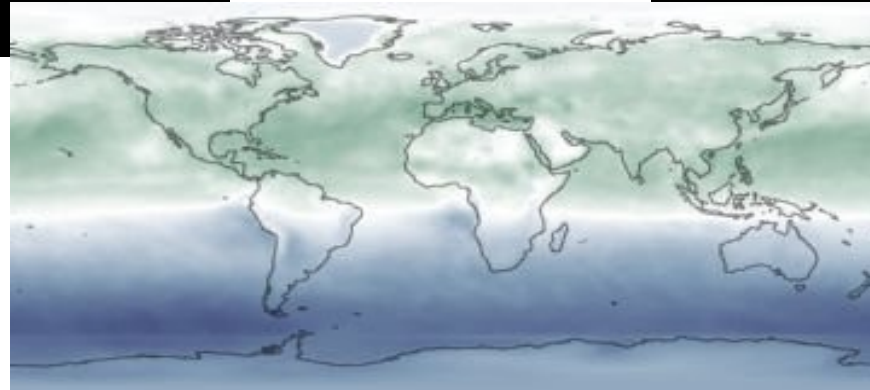
Reflected Solar Radiation ( $W/m^2$ )



Przykład:  
LIPIEC 2005  
- zima na półkuli  
południowej.



Emitted Heat Radiation ( $W/m^2$ )



Net Radiation ( $W/m^2$ )



## Problem rozkładu łądów:

### Zonal Mean Surface Temperature, 1970-2000

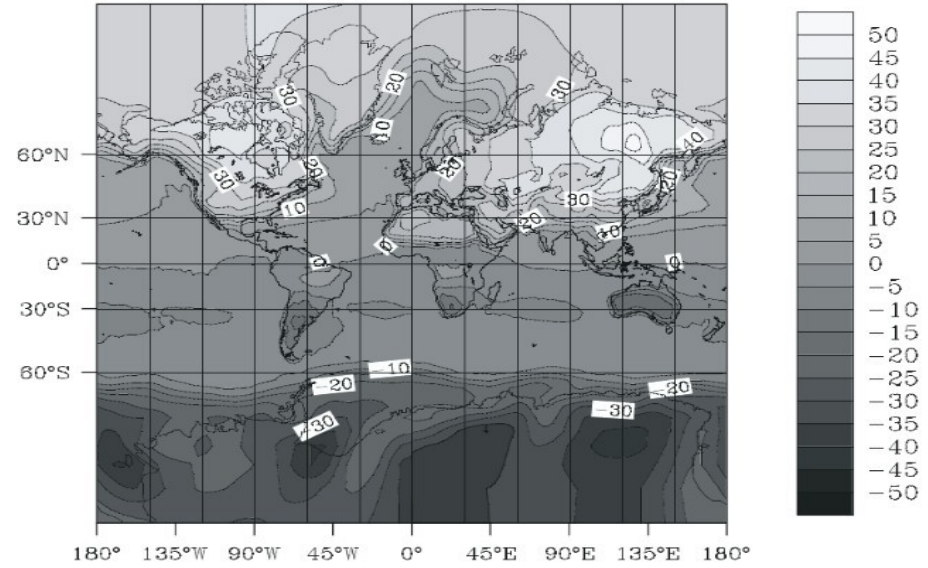
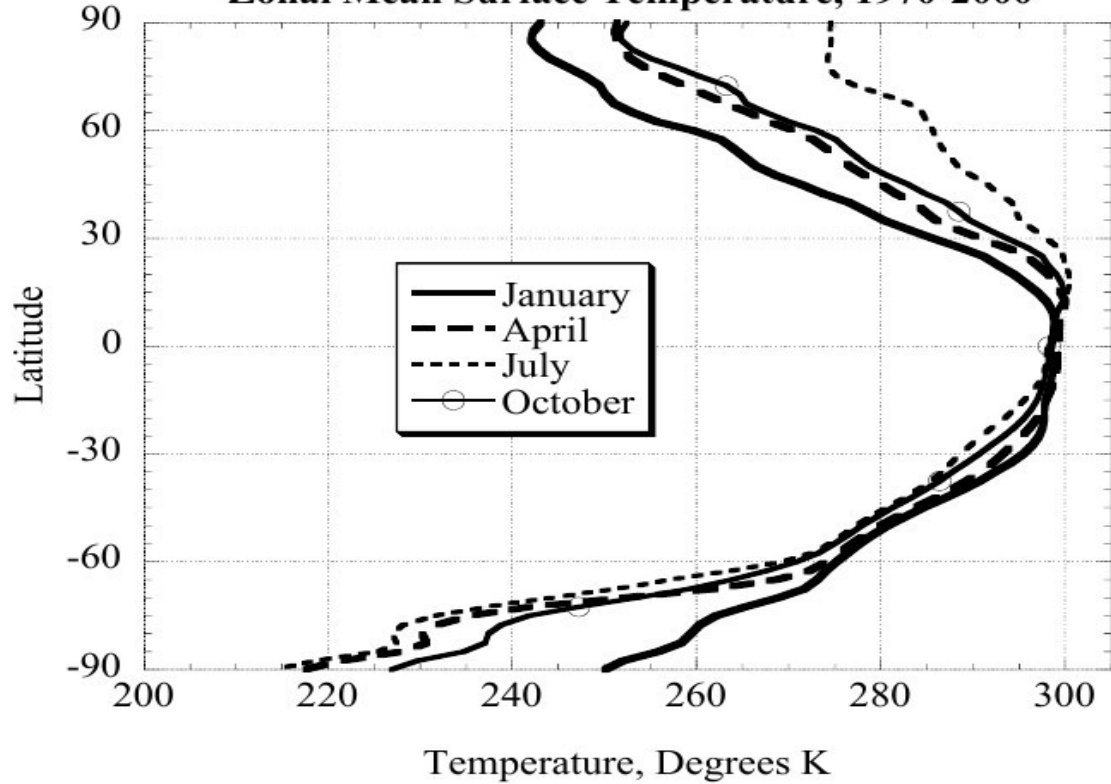
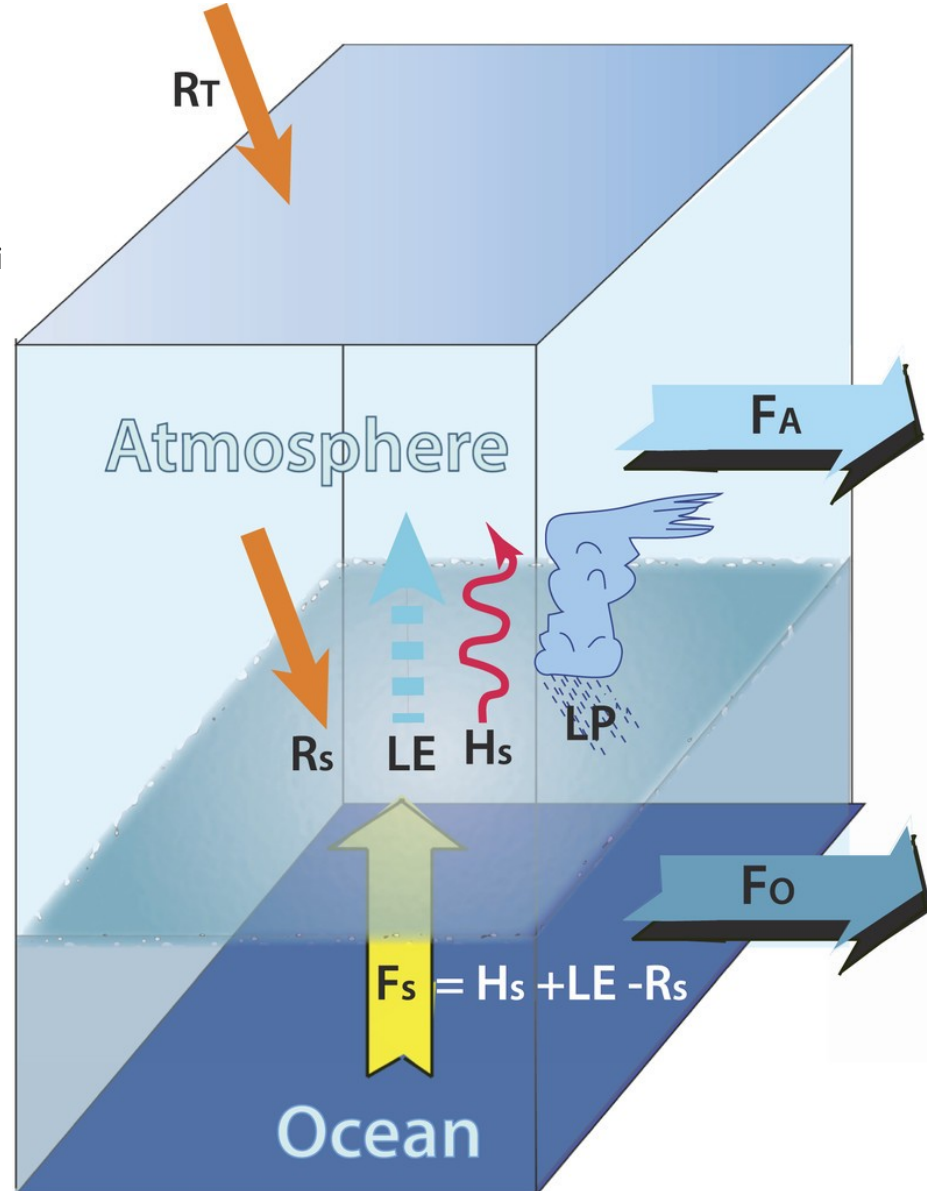


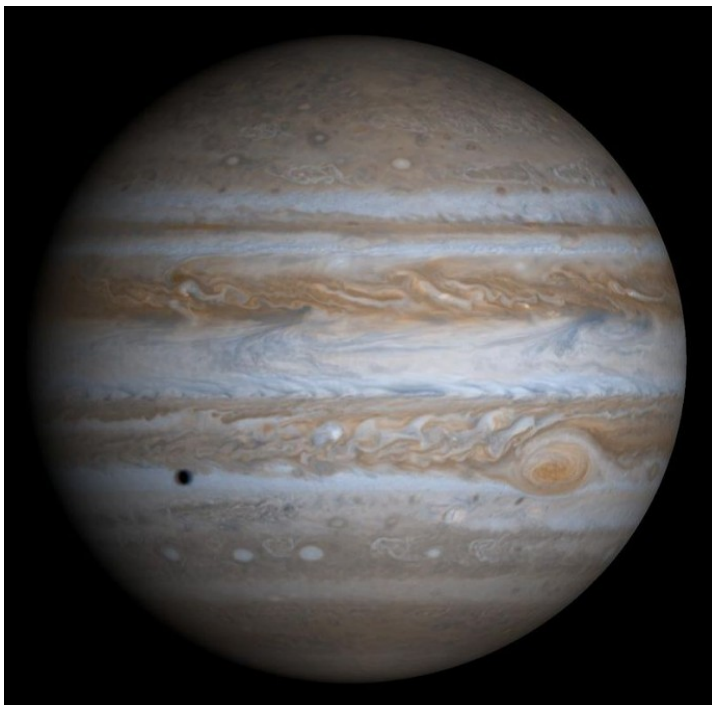
Figure 7.2: Map of July-January surface air temperature difference.

Observed zonal mean surface air temperatures for January, April, July and October. Computed from NCEP data for 1970-2000. (Pierrehumbert, „Principles of planetary climate”)

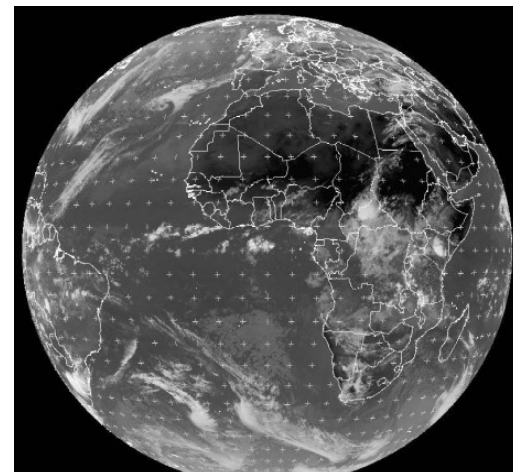
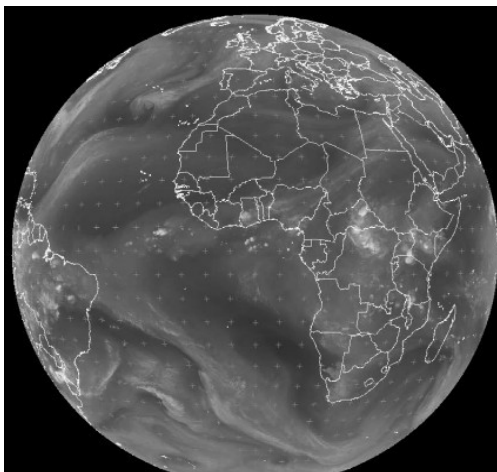
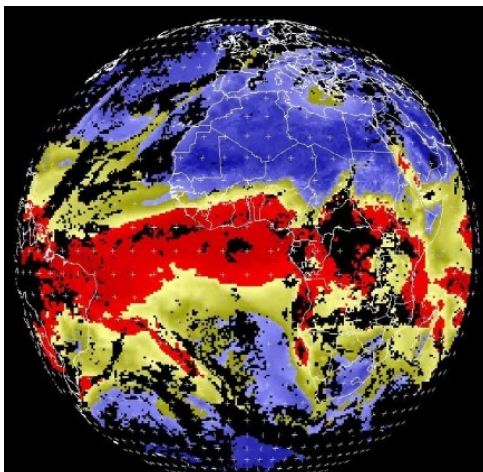
Ciepło jest przenoszone w atmosferze w postaci jawnej i utajonej. To ostatnie związane jest z przemianami fazowymi – parowaniem i skraplaniem wody. Wyparowanie 1 litra wody zabiera z powierzchni morza, roślin czy gruntu ~2500 KJ energii. Para wodna jest gazem, jednym ze składników powietrza, i jako taka jest unoszona przez cyrkulacje atmosferyczne. Energia pobrana w procesie parowania podgrzewa powietrze w procesie kondensacji pary wodnej. Utajone ciepło parowania przenosi 20-25% całkowitego strumienia energii od szerokości podzwrotnikowych do podbiegunowych. Nieco mniejsze są ilości ciepła przenoszone adwekcyjnie: przez prądy morskie (rzędu 15-20%) oraz przez ruch ciepłych mas powietrza w kierunku biegunów i chłodnych w kierunku równika. Procesy związane z absorpcją i emisją promieniowania (ochładzanie i ogrzewanie) oraz przeniesieniem ciepła w postaci jawnej i utajonej zachodzą w różnych skalach przestrzennych i czasowych:

- przy powierzchni Ziemi w przeciągu kilku minut (gdy chmura zasłania słońce przestaje dopływać energia słoneczna),
- w cyklu dobowym (proszę obejrzeć sobie fluktuacje temperatury i strumienie energii słonecznej i promieniowania podczerwonego mierzone w naszym punkcie pomiarowym: <http://metobs.igf.fuw.edu.pl/> zakładka Radiometers),
- zmiany pogody w skali dni i tygodni,
- zmienność warunków atmosferycznych z roku na rok.

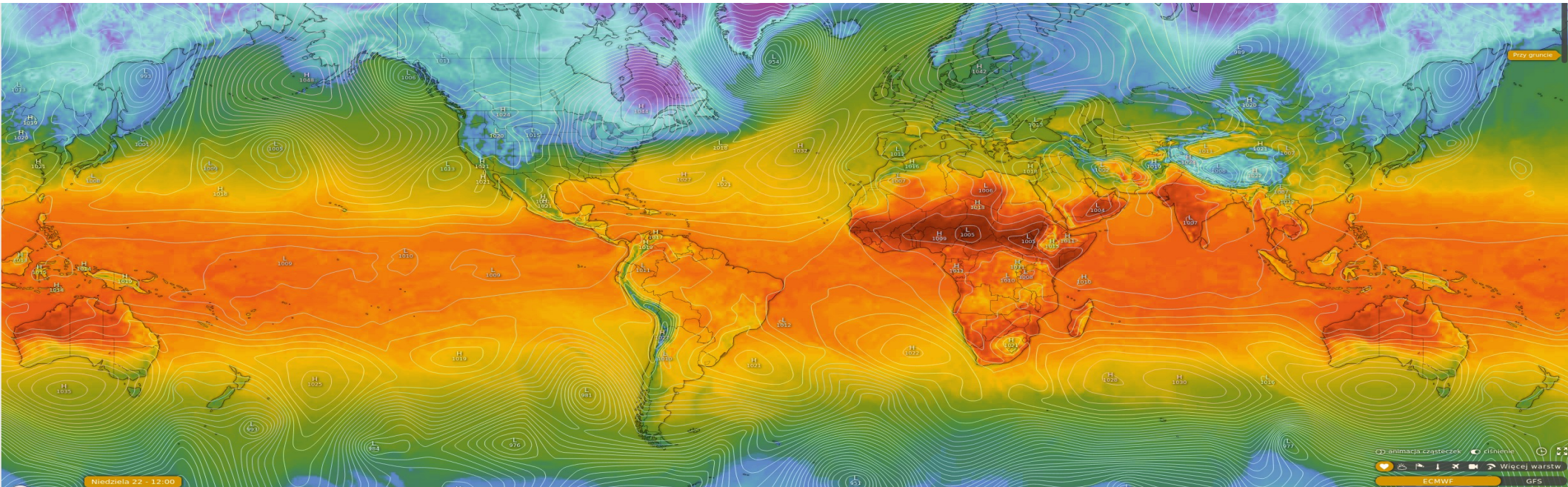




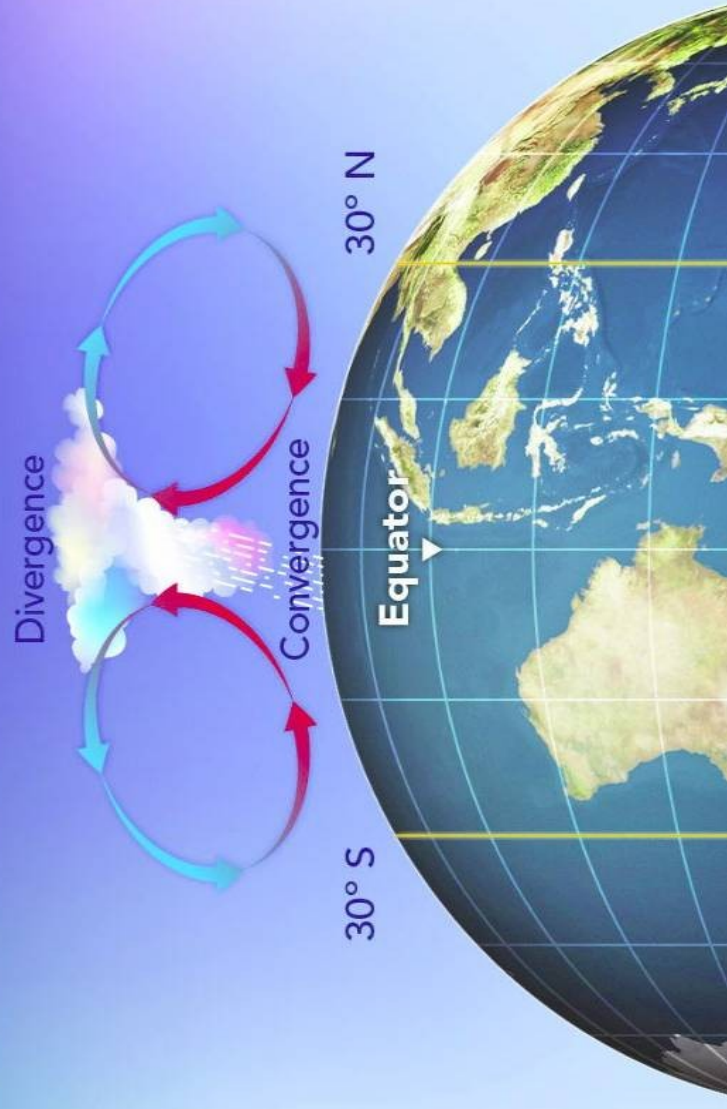
Atmosfery innych planet też mają komórki cyrkulacyjne, czasem lepiej widoczne niż w przypadku Ziemi.



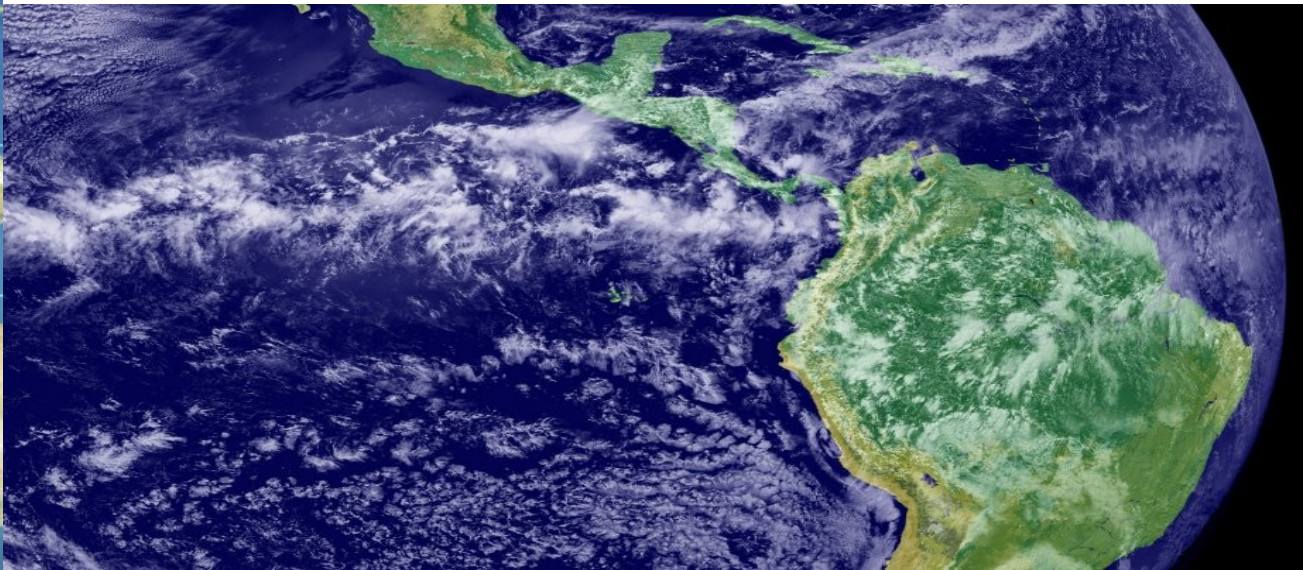
Z kolei w atmosferze na równiku nie ma wyżów i niżów!



<https://www.windy.com/>



Komórka Hadleya i strefa zbieżności równikowej.



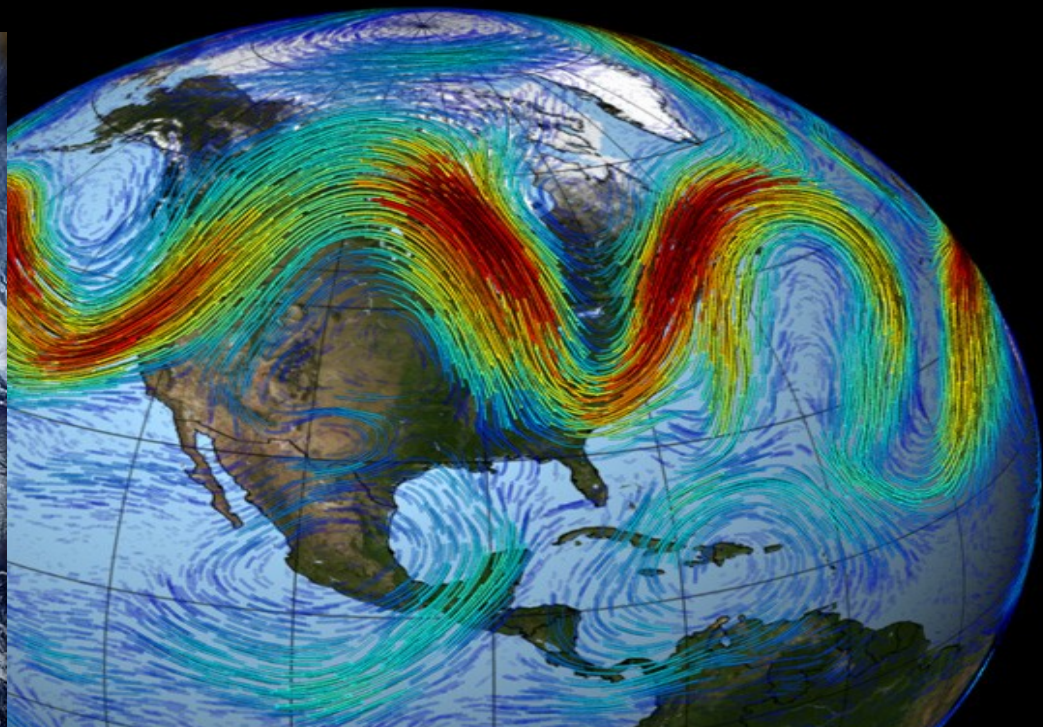
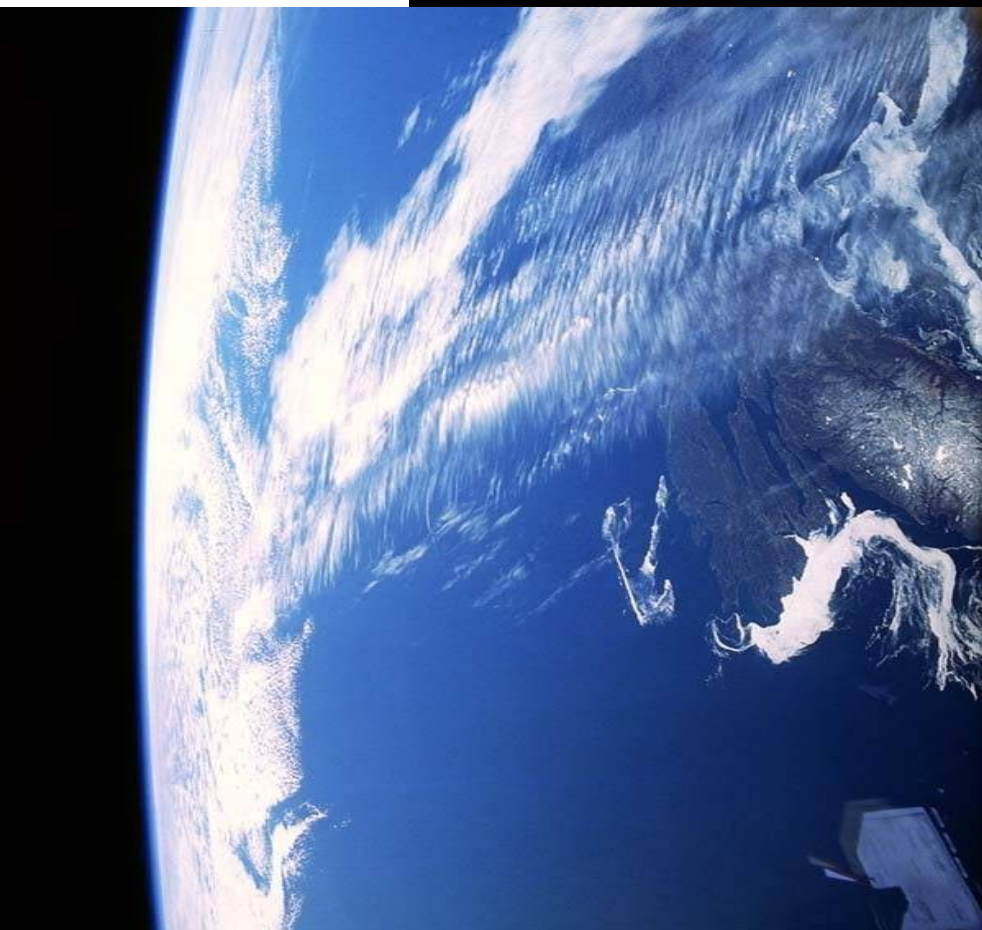
The Hadley circulation is driven mostly from the subtropics through cooling by transient baroclinic waves in storm tracks at mid-lats.

This is reason Hadley circulation varies with annual cycle.

The cooling drives the downward branch of the Hadley circulation, clears the skies to allow OLR to contribute, and allows solar radiation through to surface where it provides moisture through evaporation.

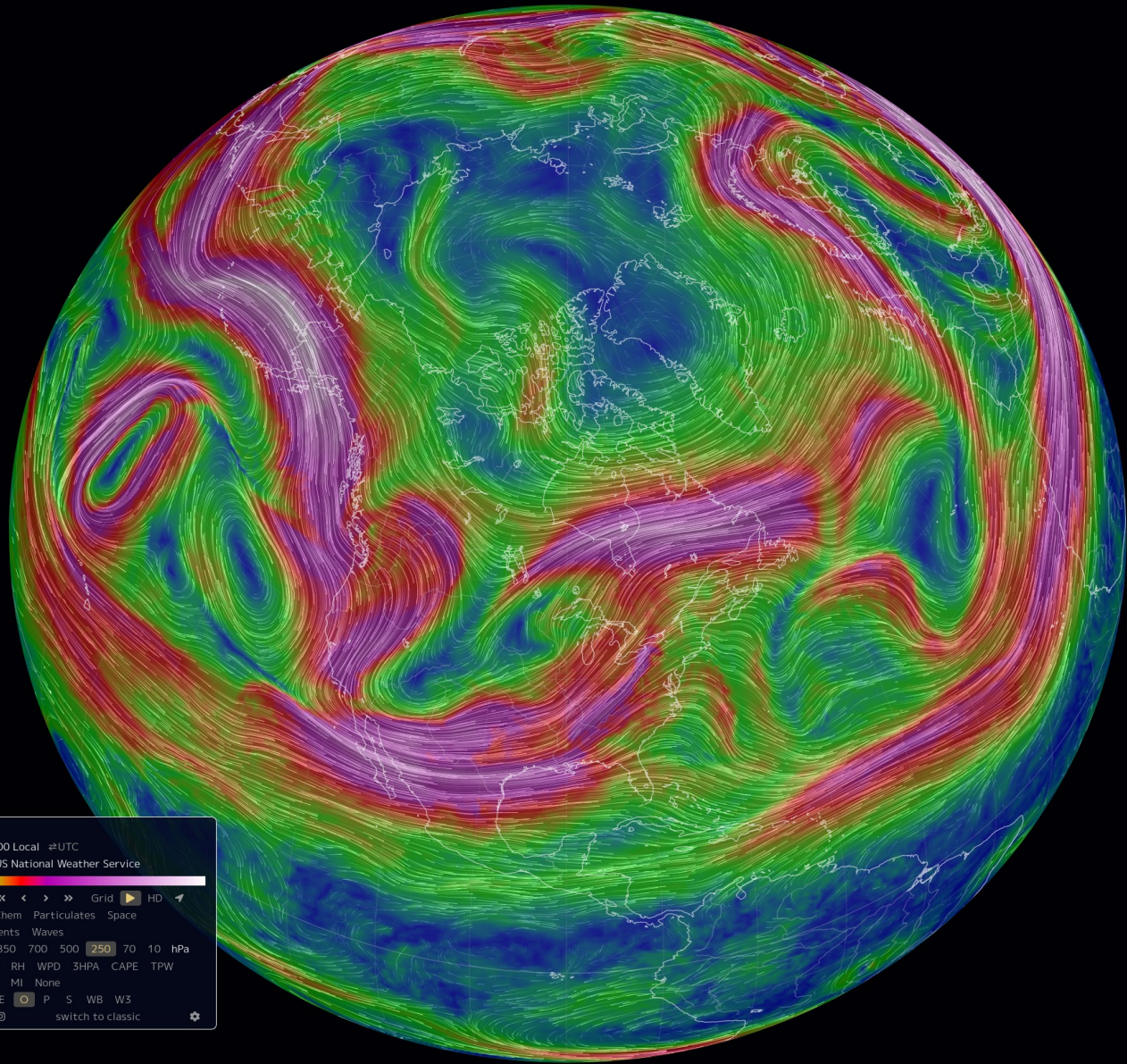
Tropical SSTs determine where the upward motion is favored, and the upward motion is driven by latent heating. But the moisture comes mostly from the subtropics, transported by the Hadley circulation itself.

The subtropical OLR and the tropical latent heating are secondary consequences of the more fundamental drivers.



Prądy strumieniowe (jet-streams).

W obszarze objętym zmienia się charakter transportu ciepła....



Data | Wind @ 250hPa  
Date | 2021-03-24 10:00 Local ≠UTC  
Source | GFS / NCEP / US National Weather Service  
Scale |

Control | Now Grid HD

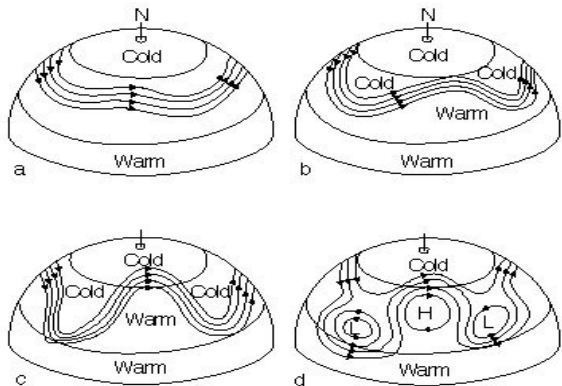
Mode | Air Ocean Chem Particulates Space

Animate | Wind Currents Waves

Height | Sfc 1000 850 700 500 **250** 70 10 hPa

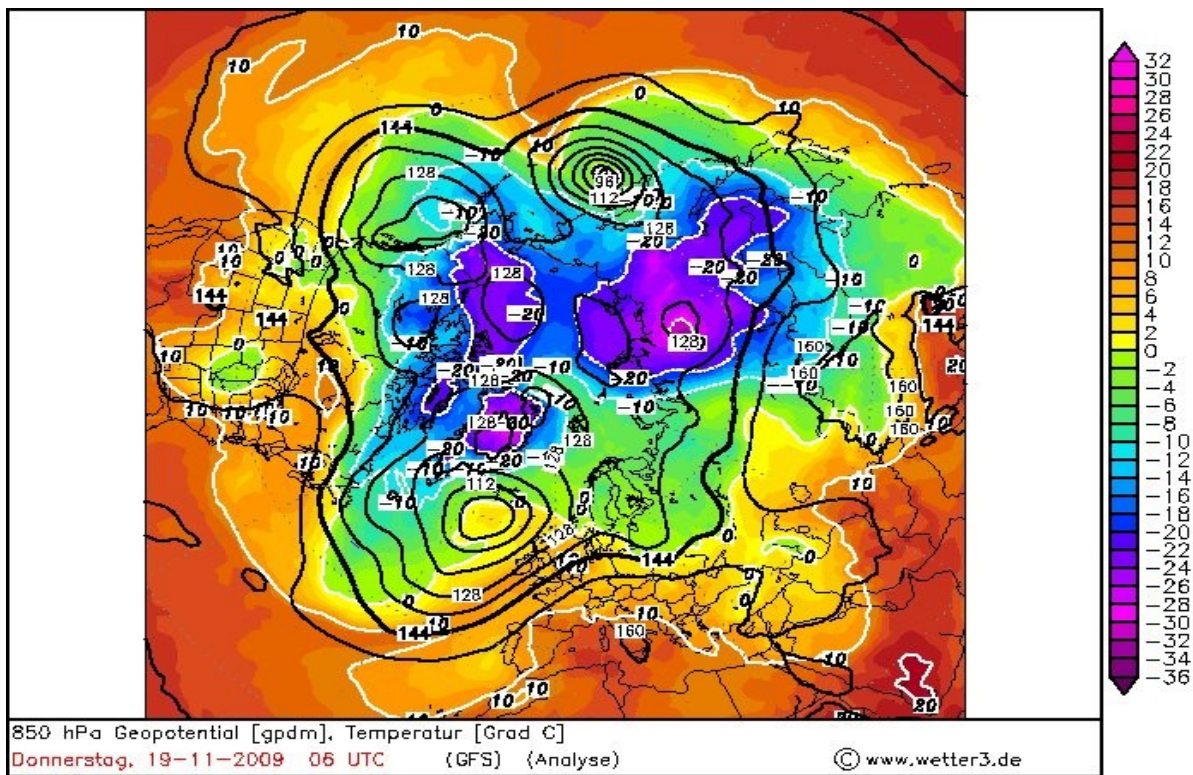
Overlay | Wind Temp RH WPD 3HPA CAPE TPW  
TCW MSLP MI None

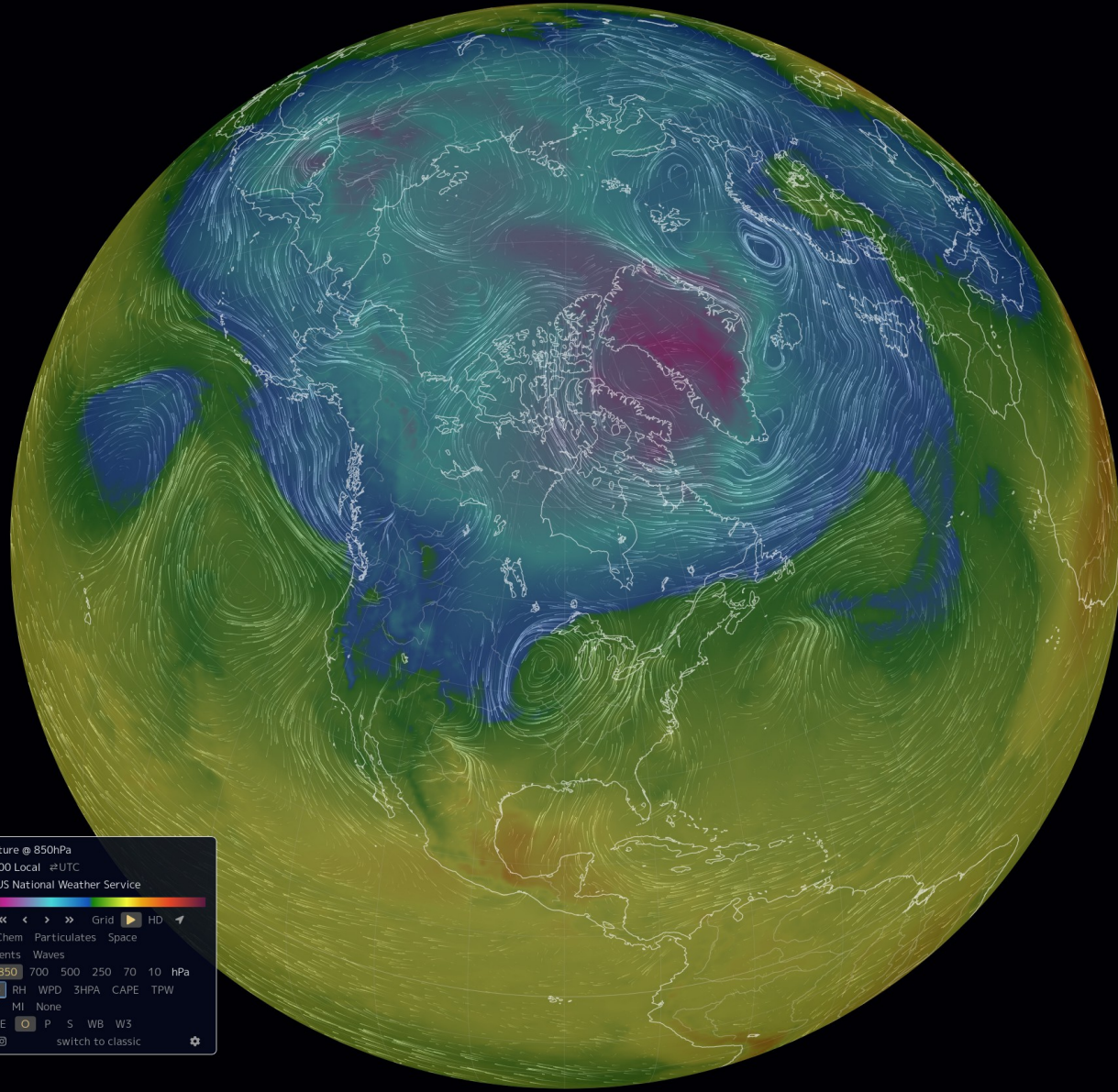
Projection | A CE E  P S WB W3  
about @ switch to classic















Tworzenie się układów wysokiego i niskiego ciśnienia: transport ciepła ku biegunom przez wiry o osi pionowej w umiarkowanych szerokościach geograficznych.

Przykład:  
rozkład temperatur na poziomie 850 hPa.  
Projekcja mapy od strony bieguna północnego. Należy zauważyć „języki” zimnego powietrza rozpełzające się wokół bieguna.





Data | Wind + Temperature @ 850hPa  
Date | 2021-03-24 09:00 Local  $\neq$ UTC  
Source | GFS / NCEP / US National Weather Service  
Scale |   
Control | Now      HD   
Mode | **Air** Ocean Chem Particulates Space  
Animate | **Wind** Currents Waves  
Height | Sfc 1000 **850** 700 500 250 70 10 hPa  
Overlay | Wind **Temp** RH WPD 3HPA CAPE TPW  
TCW MSLP MI None  
Projection | A CE E **O** P S WB W3  
about     switch to classic 

### 1. In tropics:

Global monsoon TE transport is small residual of DSE and LE.

Solar radiation in clear skies heats ocean, cooled by evaporation:  
moisture transported into upward branch, feeds DSE.

Circulation that provides transport, supplies LE.

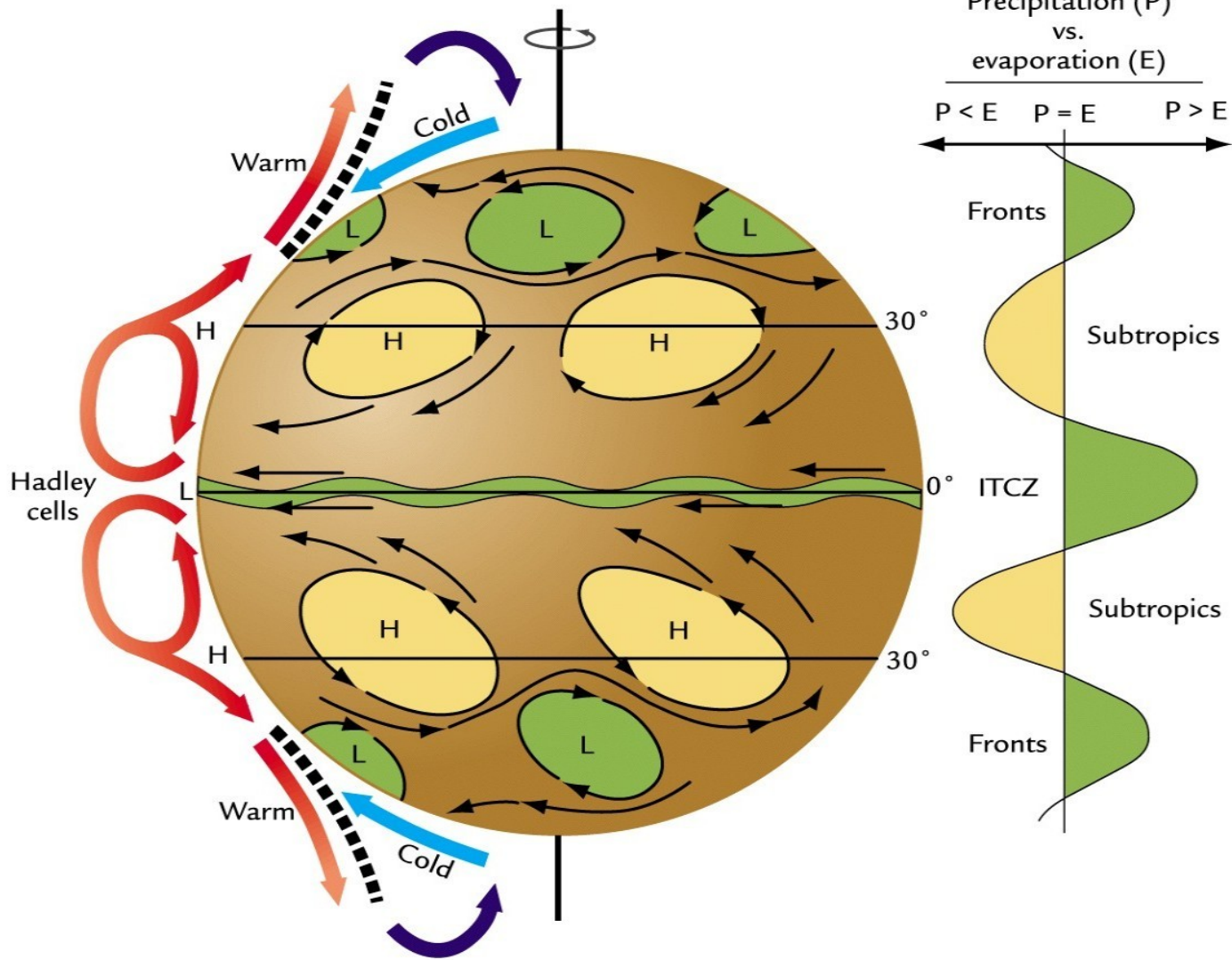
### 2. In extratropics:

transient baroclinic waves LE and DSE additive, moisture more prominent in low-mid- latitudes.

### 3. Subtropics:

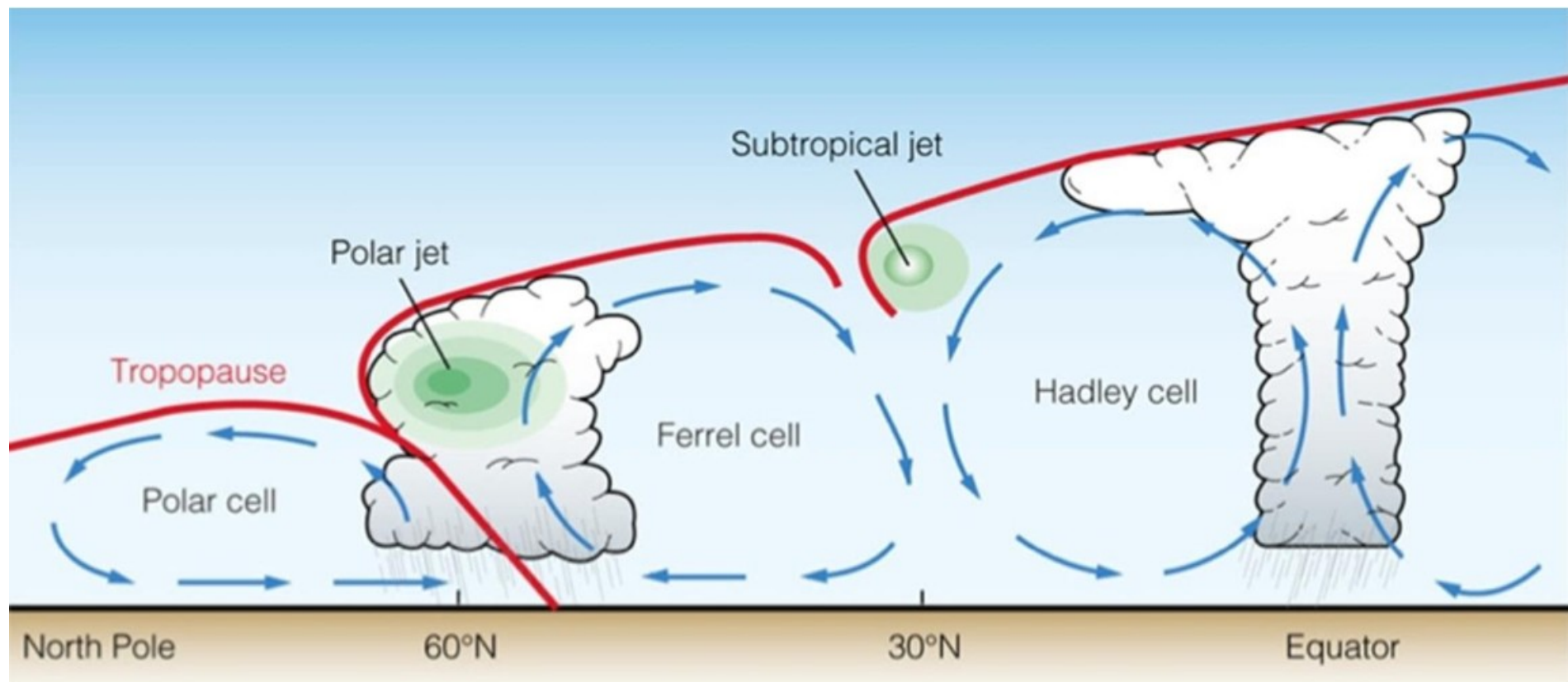
substantial cooling by baroclinic waves coordinated with Hadley circulation adiabatic warming; and upward motion near equator.

I.e. Hadley circulation and mid-latitude storm tracks directly linked, seamless total energy transport on seasonal time scales



Ogólna cyrkulacja atmosfery: efektywny transport ciepła od równika ku biegunom.

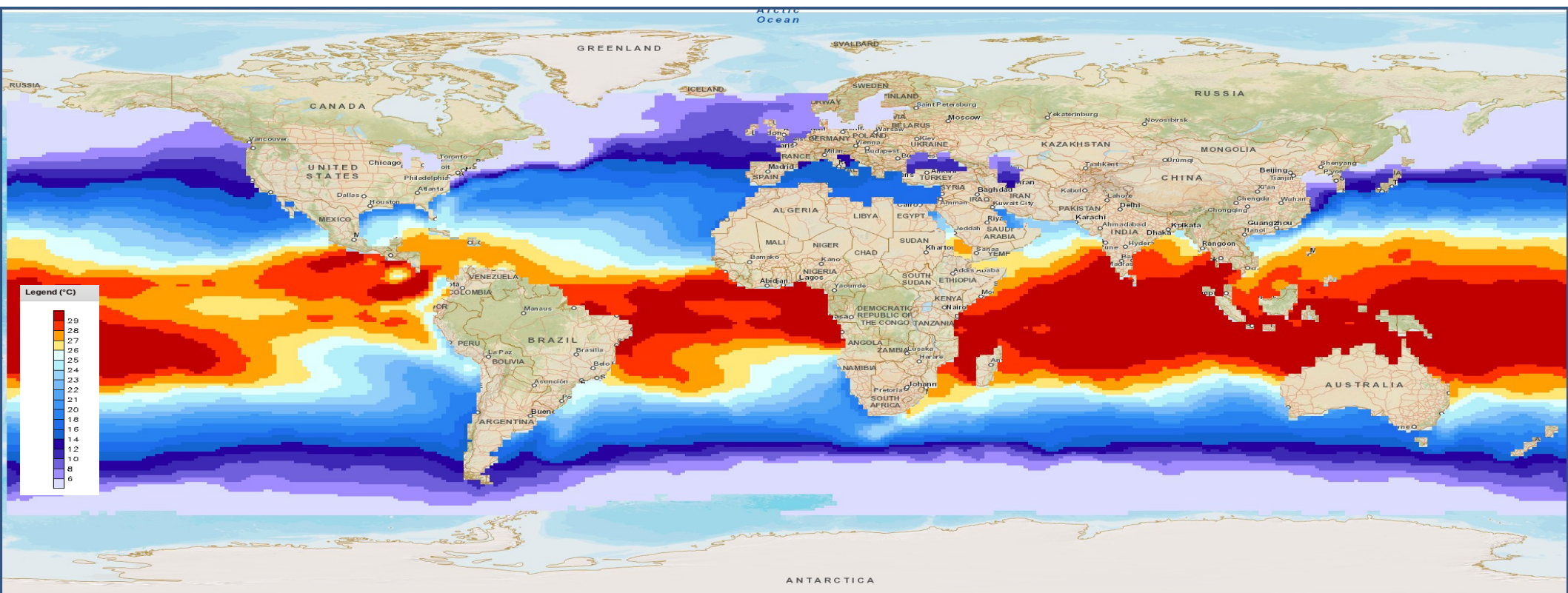
Diagram po prawej stronie pokazuje schematycznie efekty ciepła utajonego.

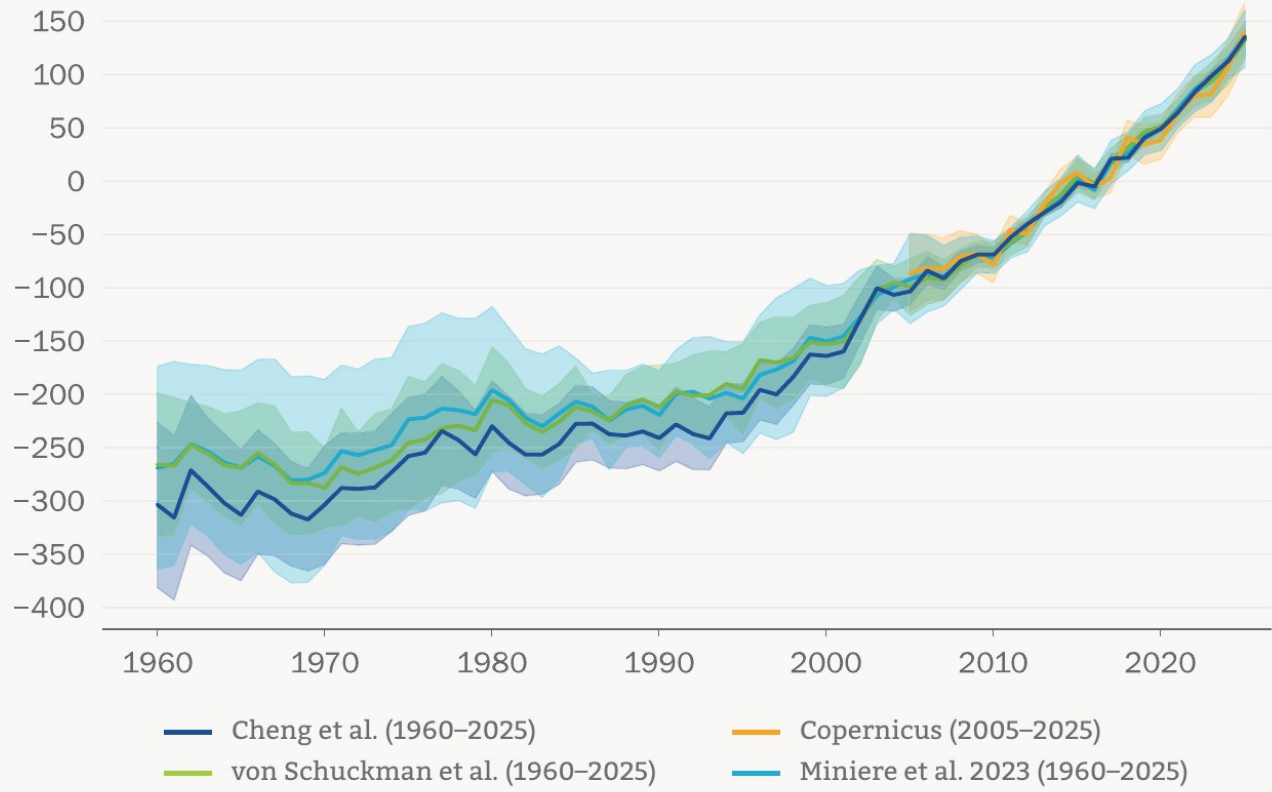


**Fig. 1 Global atmospheric circulation.** *Credit: Geophile pages.*

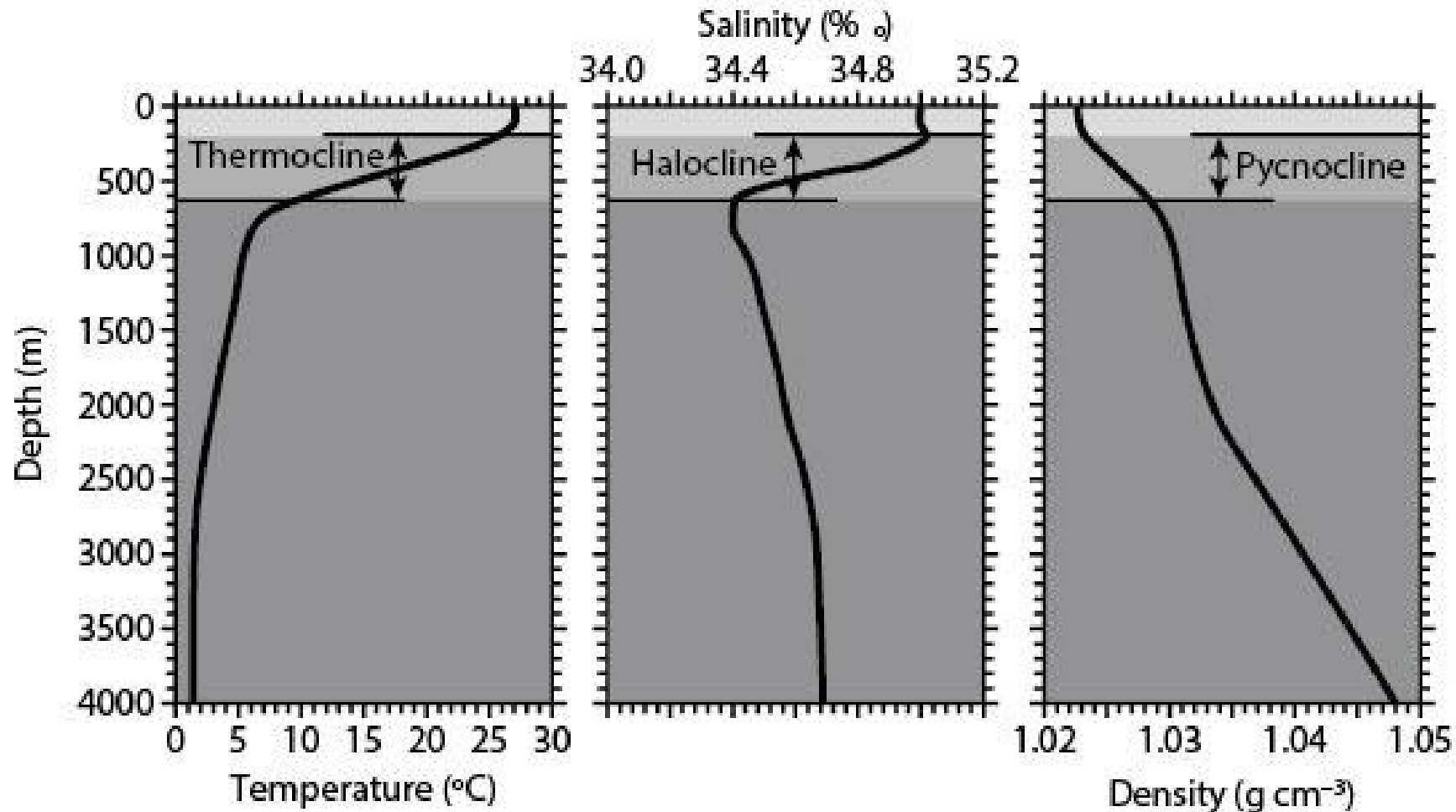
# Temperatura powierzchni morza - SST (Sea Surface Temperature) – średnia tygodniowa, 04-11/03/2020.

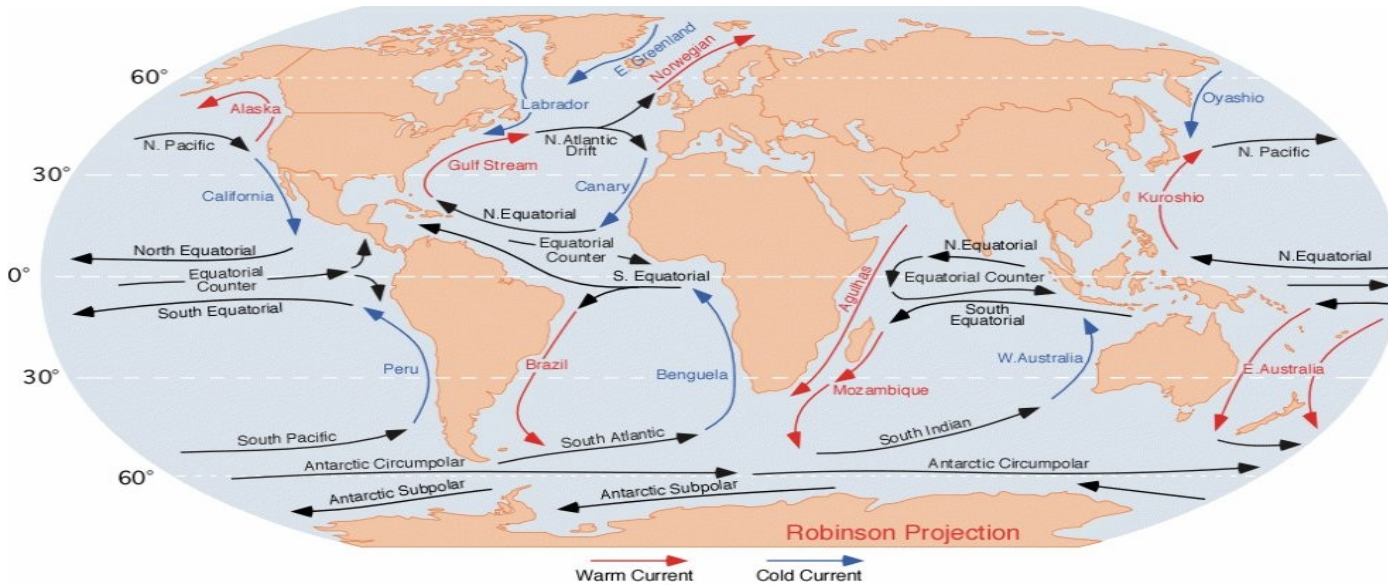
Widać znaczne odchylenia od strefowości.



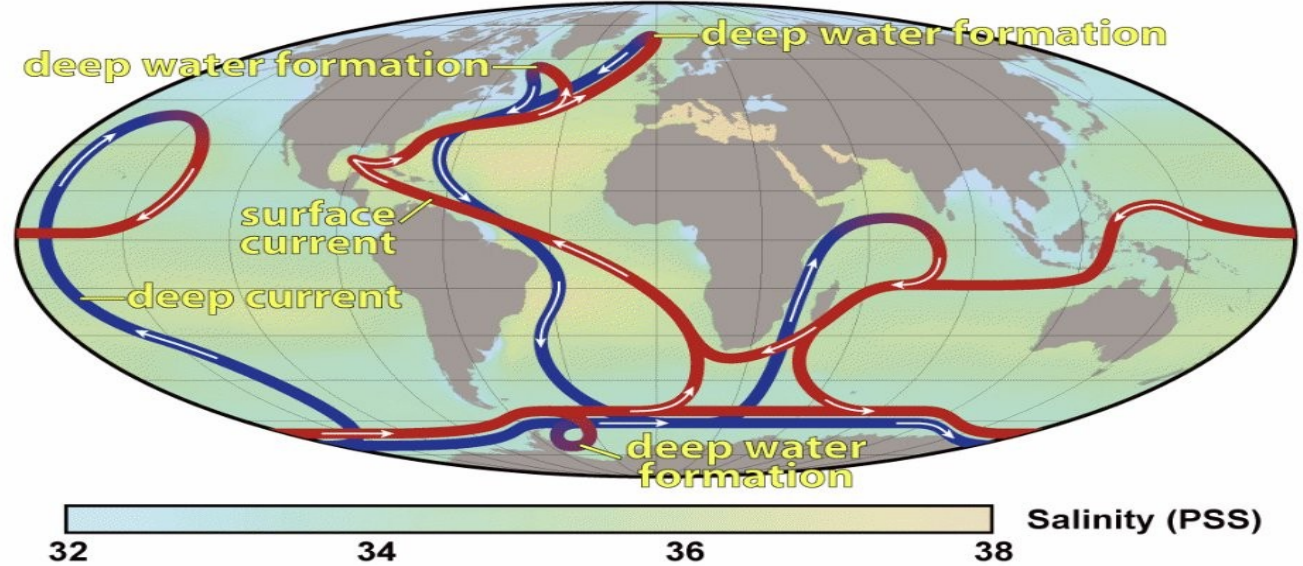


**Figure 3.** Annual global ocean heat content down to 2 000 m depth for the period 1960–2025, in zettajoules (ZJ). One zettajoule is  $10^{21}$  joules. The shaded area indicates the 2-sigma uncertainty range on each estimate. For details see Datasets and methods.

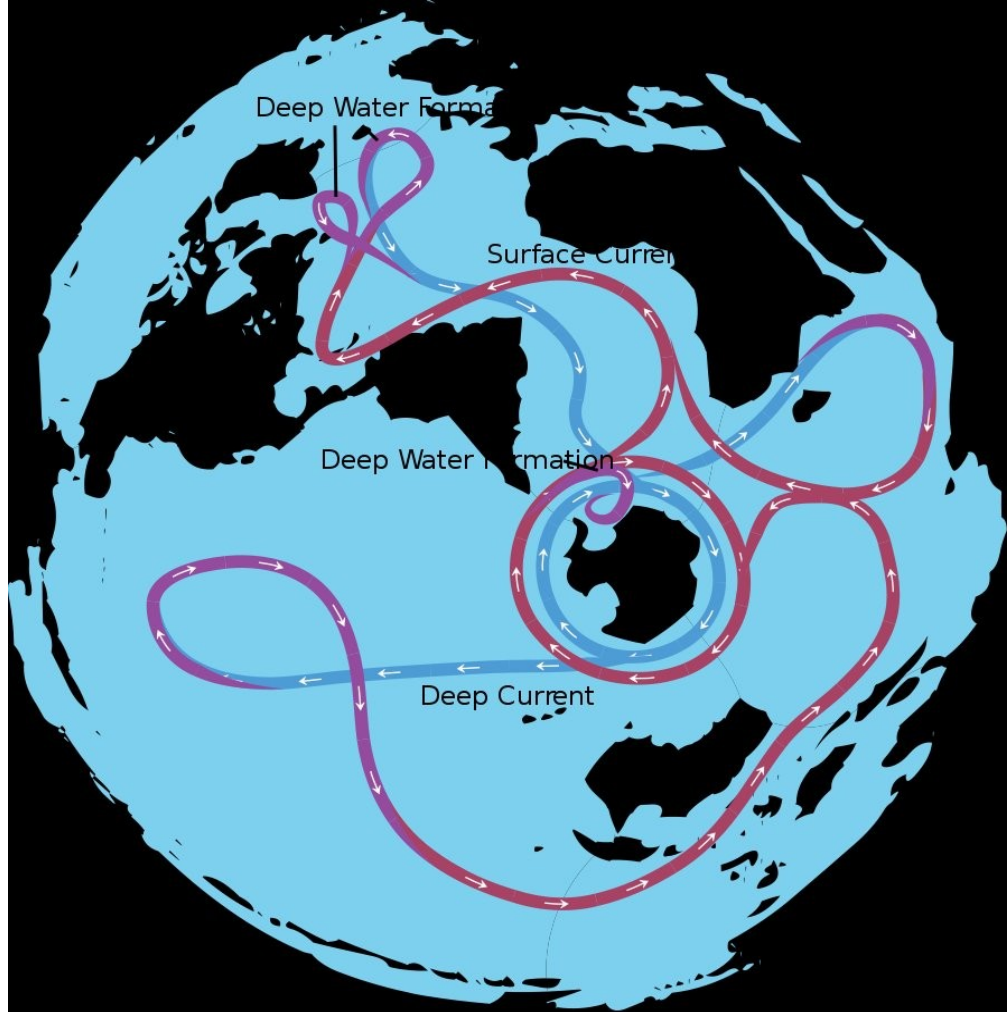




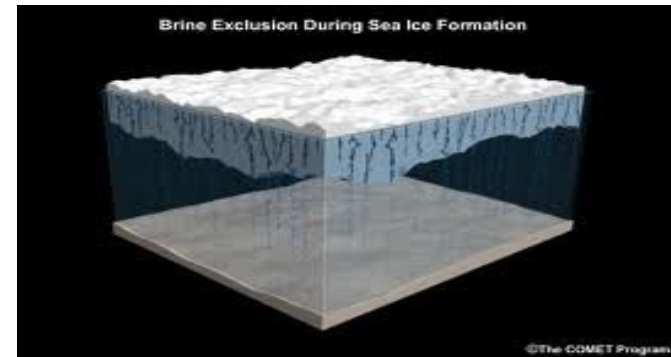
Powierzchniowe prądy morskie. Kolorami oznaczono względną temperaturę wody: czerwień - prąd ciepły, błękit - prąd chłodny.



Cyrkulacja termohalinowa w oceanach, wpływająca na temperaturę i zasolenie wody w poszczególnych rejonach. Czerwonymi liniami oznaczono powierzchniowe prądy morskie (surface current), kształtowane przez wiatry. W miarę zbliżania się do biegunów, woda niesiona prądami powierzchniowymi stygnie i zaczyna opadać na dno (deep water formation). Różnicowanie w temperaturach i zasoleniu napędza głębokie prądy oceaniczne (niebieskie linie, deep currents).



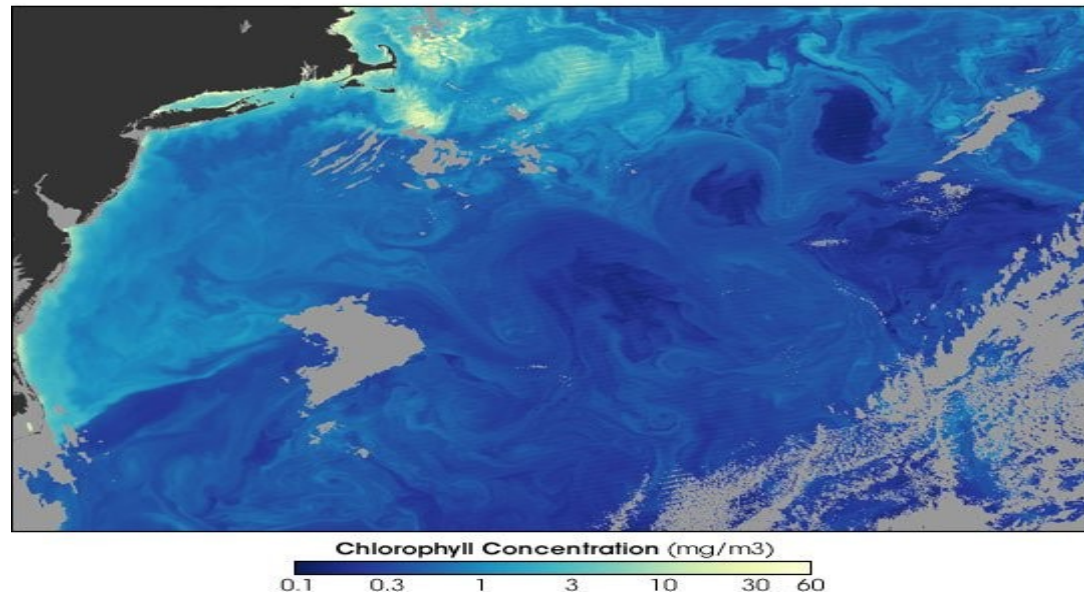
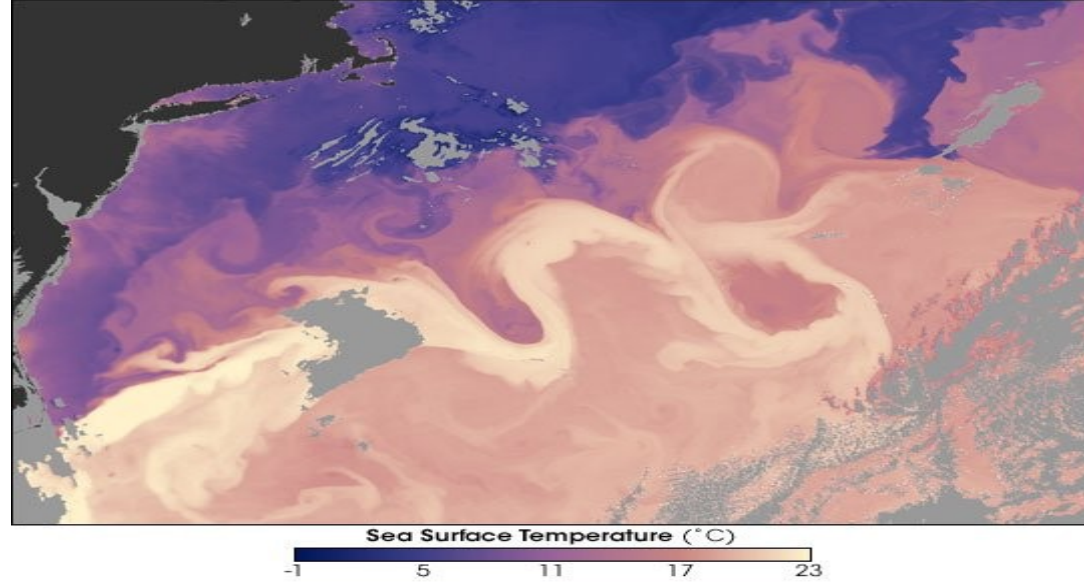
Cyrkulacja  
termohalinowa:  
„wielka pętla”

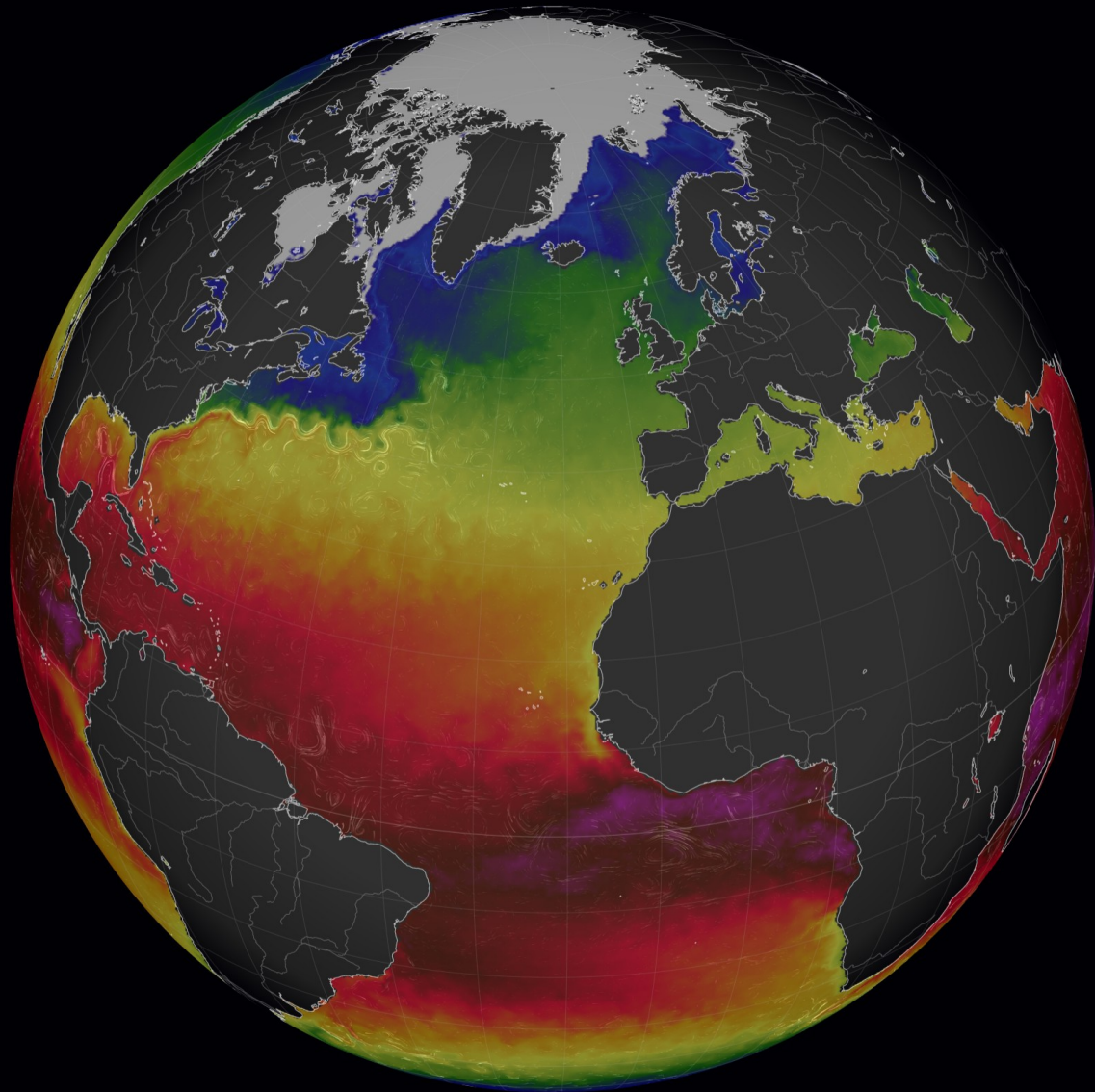


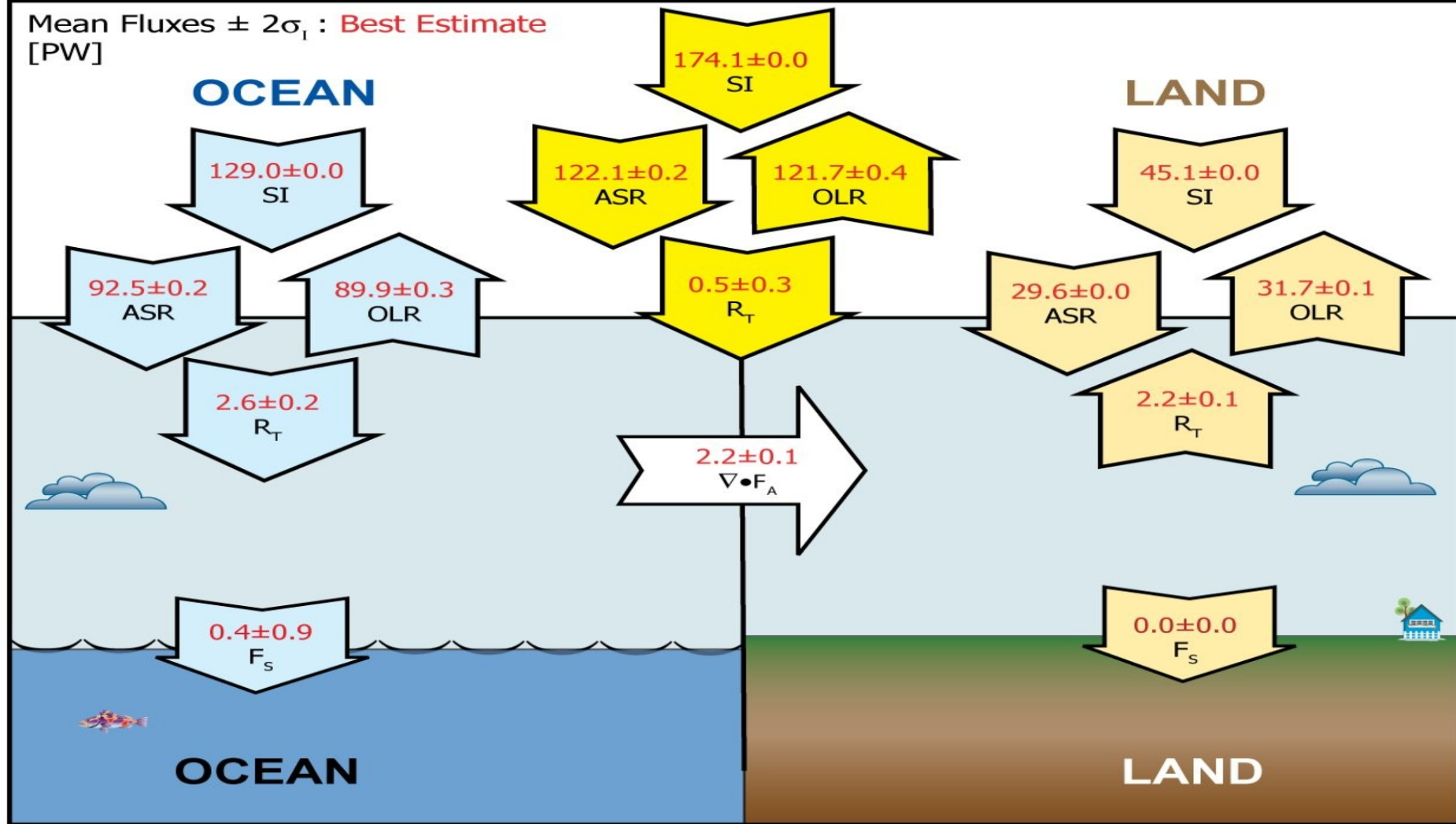
Powstawanie  
solanki podczas  
zamarzania wody  
morskiej

Prąd zatokowy -  
Golfsztrom

- widać cyrkulacje  
inercyjne  
(mniejsze pętle)

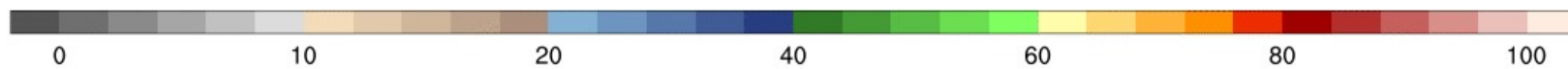
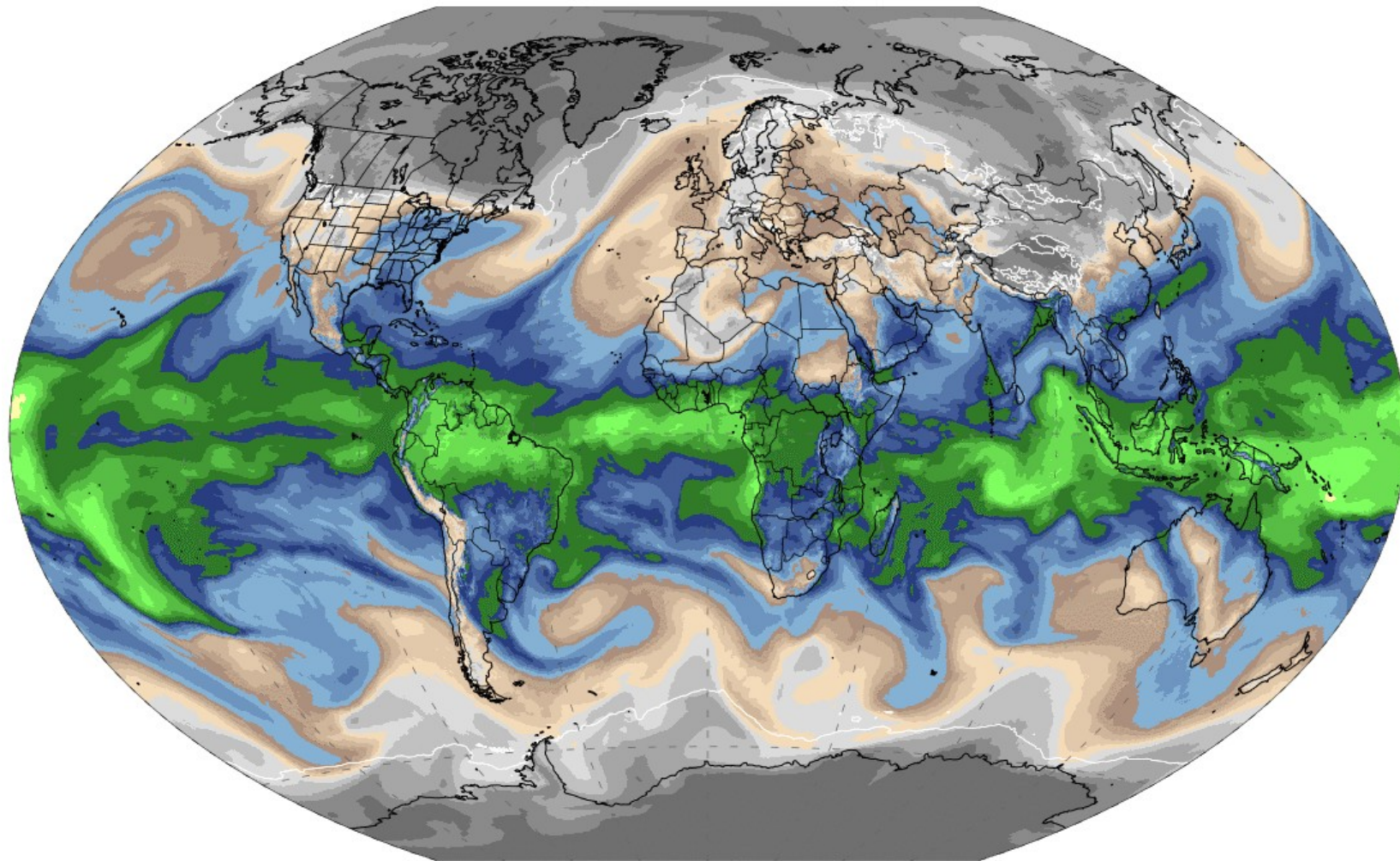




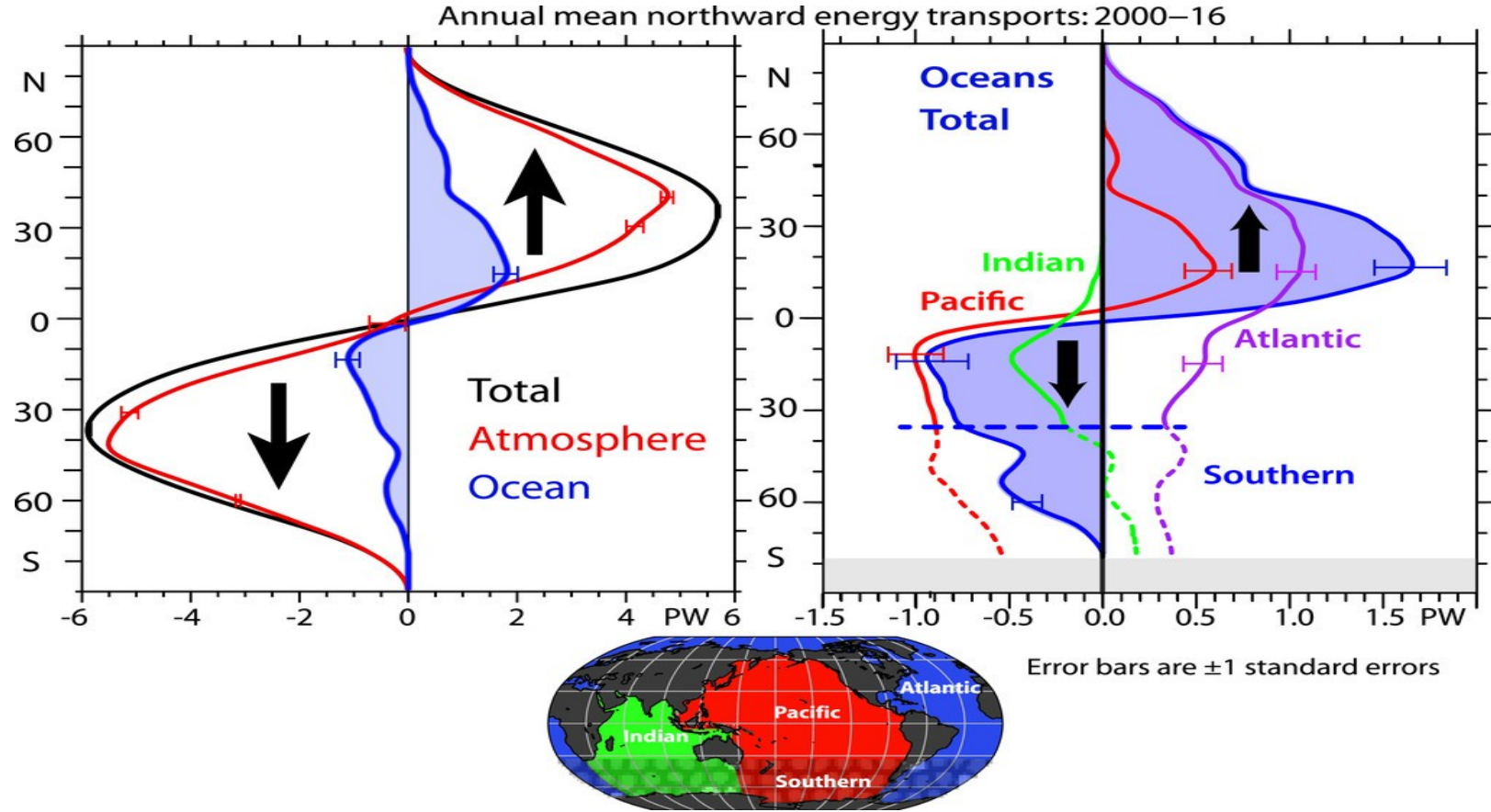


CERES- ocena strumieni energii na szczycie atmosfery (PW) globalnie oraz nad oceanem (lewy panel) i nad lądem (prawy panel).

Fasullo and Trenberth, 2008a.



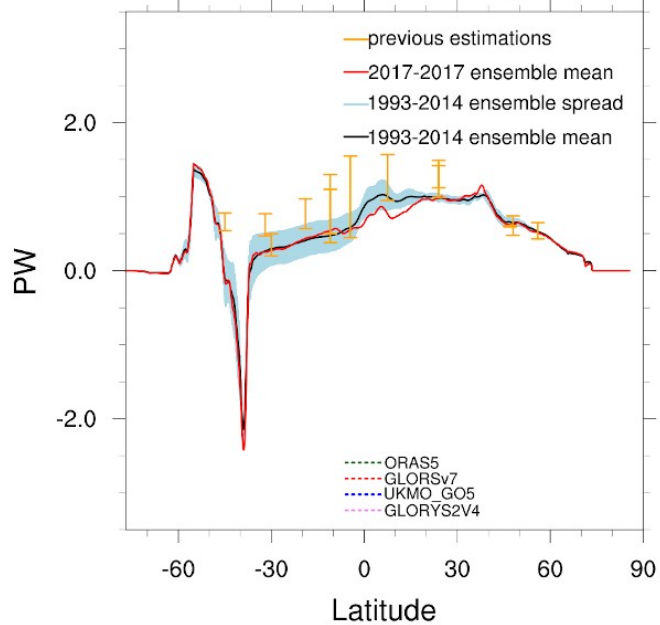
**Fig. 3.**



Zonal-mean annual long-term average meridional transports in PW for 2000–16. (left) Those inferred from TOA radiation (black), within the atmosphere from ERA-I (red), and the residual for the oceans (blue). (right) The breakdown for the oceans for the Atlantic (purple), Pacific (red), and Indian (green) and combined for the Southern Ocean south of 35°S (blue) in PW. (bottom) The domains used and the standard errors are  $1\sigma$ . The ITF transport is not included here.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0872.1>

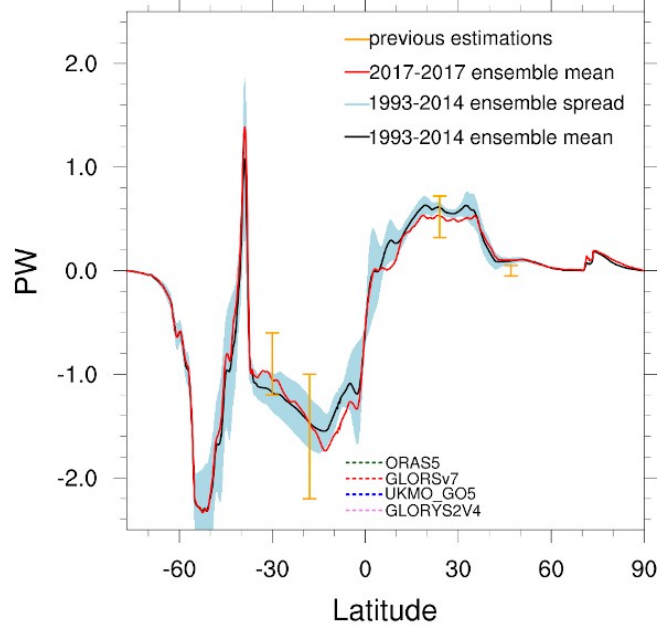
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Atlantic



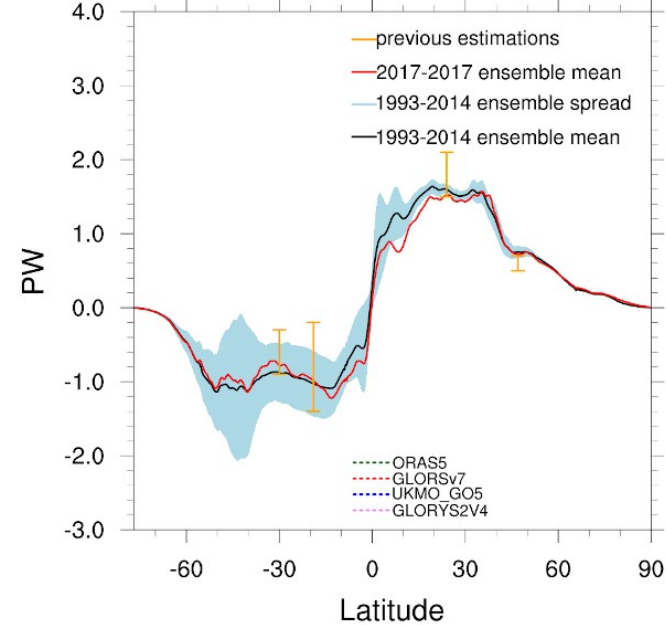
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Pacific+Indian



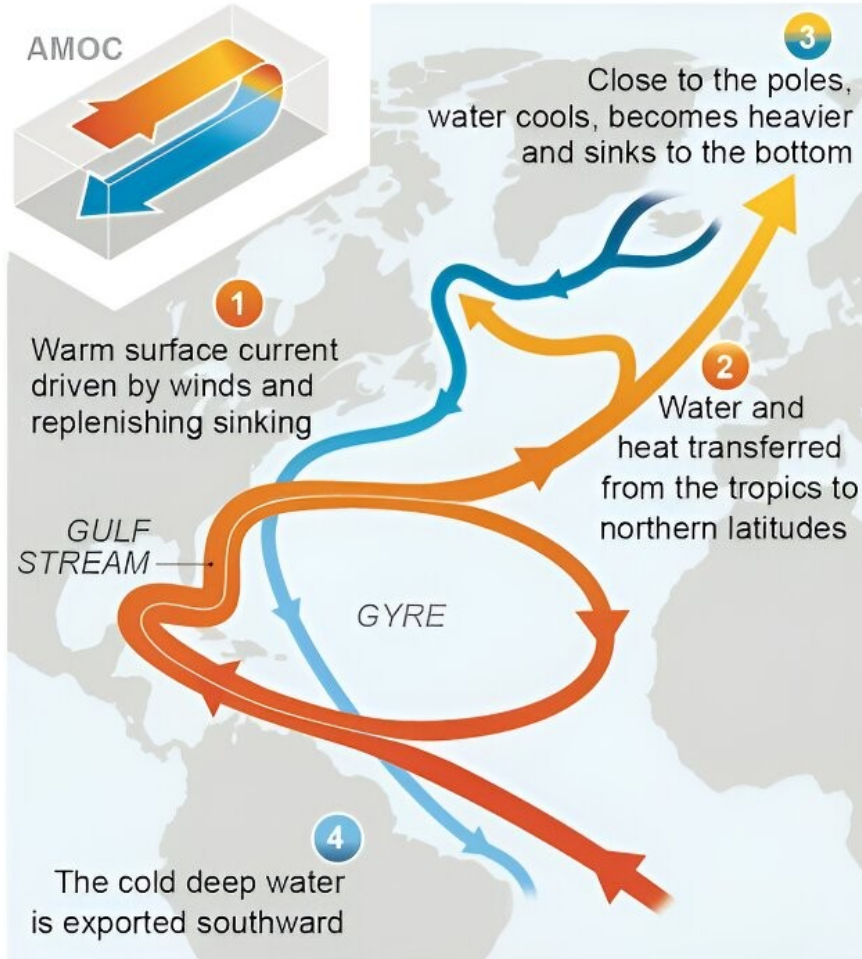
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Global



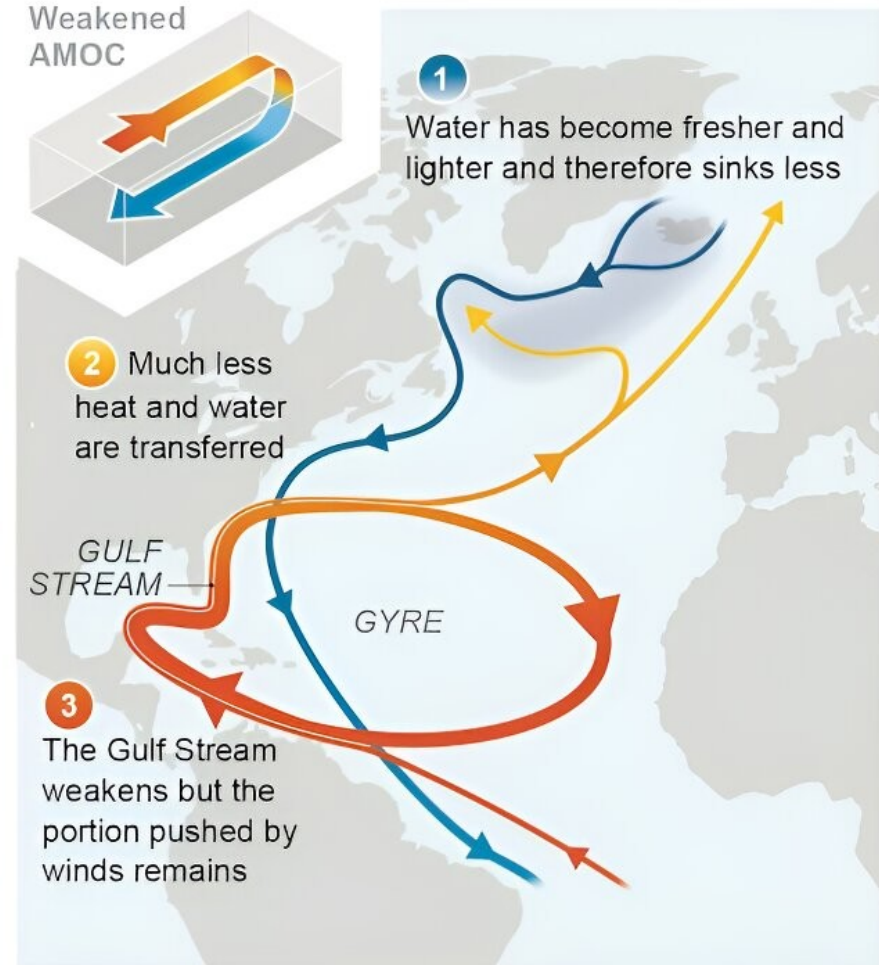
## Today

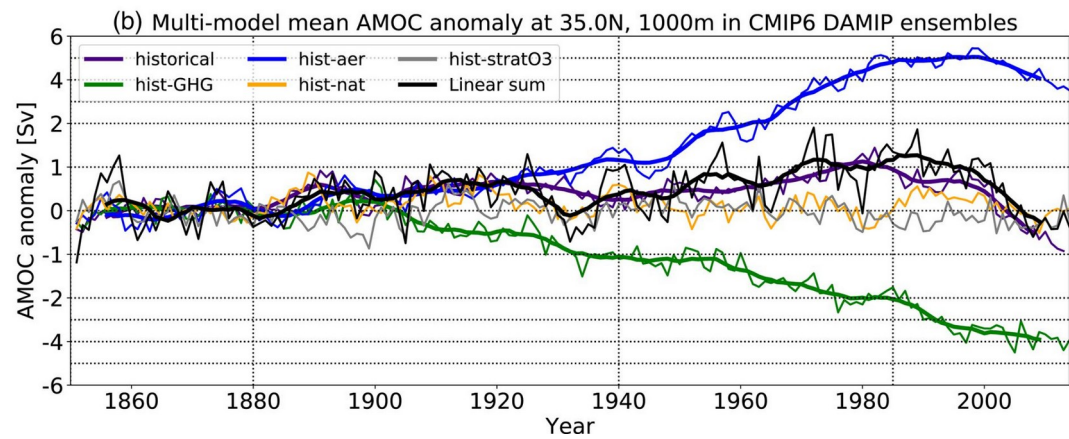
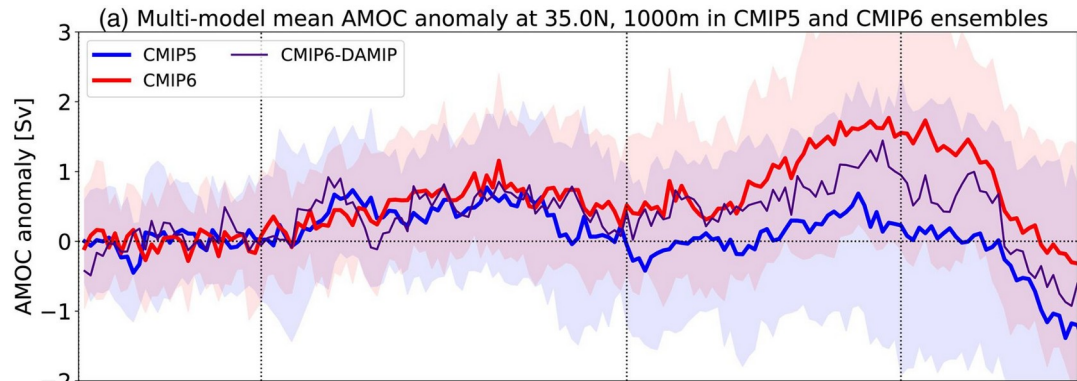
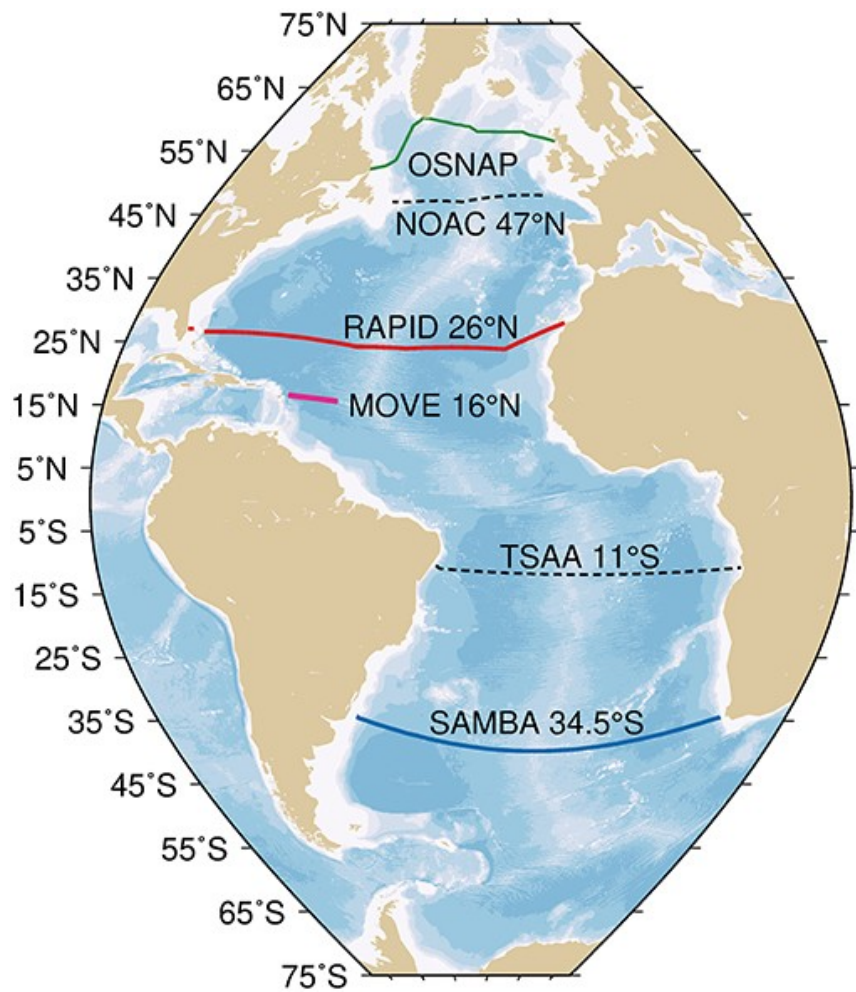
The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



## In a warmer world

Climate change weakens the AMOC, which slows the Gulf Stream down



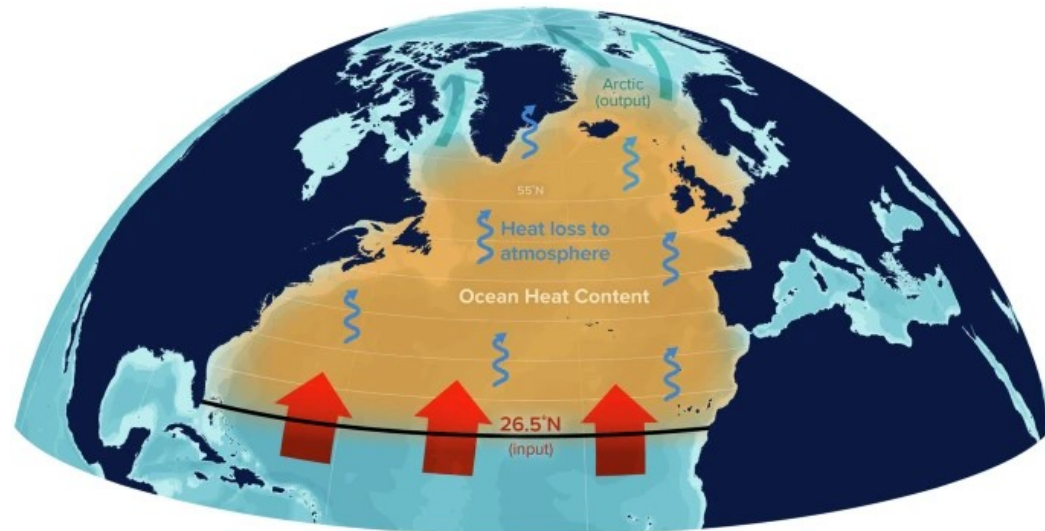
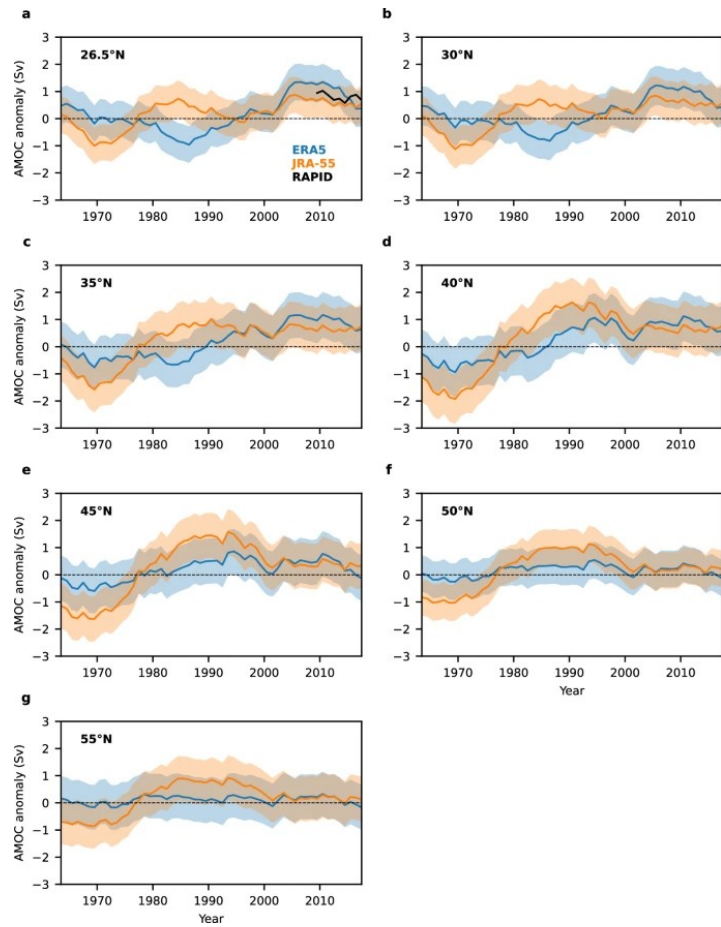


# Atlantic overturning inferred from air-sea heat fluxes indicates no decline since the 1960s

Jens Terhaar [✉](#), Linus Vogt & Nicholas P. Foukal

*Nature Communications* 16, Article number: 222 (2025) | [Cite this article](#)

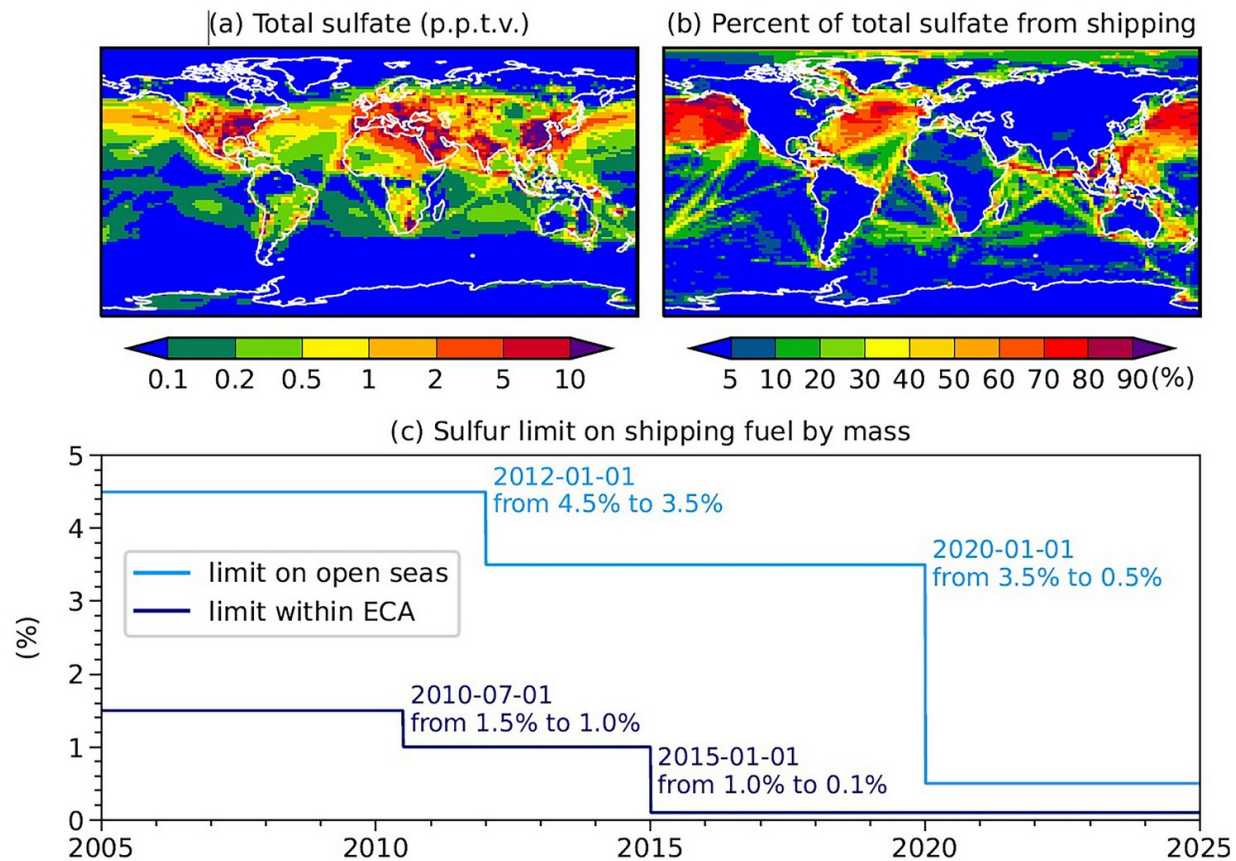
38k Accesses | 1236 Altmetric | [Metrics](#)

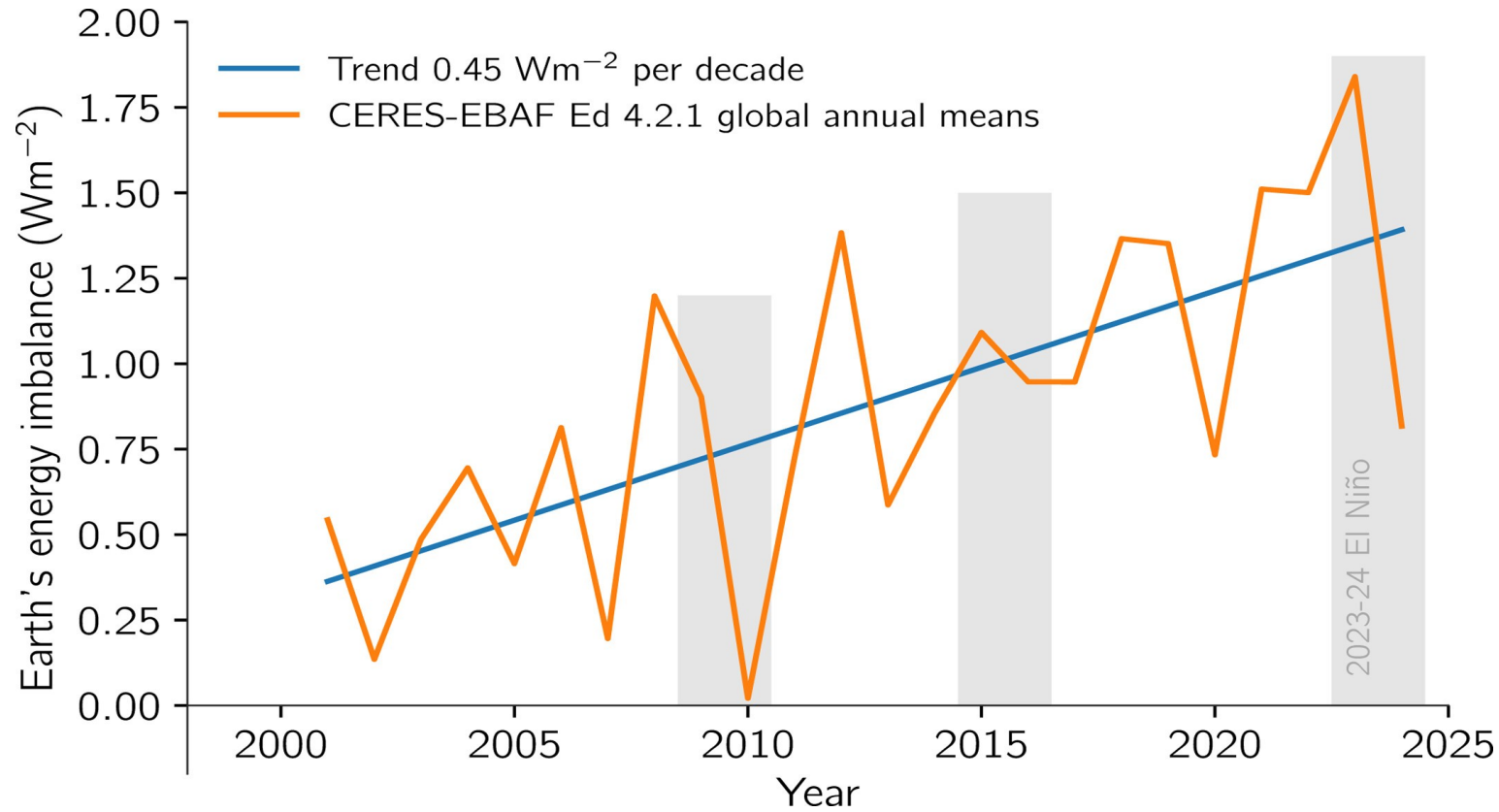


The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) is crucial for global ocean carbon and heat uptake, and controls the climate around the North Atlantic. Despite its importance, quantifying the AMOC's past changes and assessing its vulnerability to climate change remains highly uncertain. Understanding past AMOC changes has relied on proxies, most notably sea surface temperature anomalies over the subpolar North Atlantic. Here, we use 24 Earth System Models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) to demonstrate that these temperature anomalies cannot robustly reconstruct the AMOC. Instead, we find that air-sea heat flux anomalies north of any given latitude in the North Atlantic between 26.5°N and 50°N are tightly linked to the AMOC anomaly at that latitude on decadal and centennial timescales. On these timescales, air-sea heat flux anomalies are strongly linked to AMOC-driven northward heat flux anomalies through the conservation of energy. On annual timescales, however, air-sea heat flux anomalies are mostly altered by atmospheric variability and less by AMOC anomalies. Based on the here identified relationship and observation-based estimates of the past air-sea heat flux in the North Atlantic from reanalysis products, the decadal averaged AMOC at 26.5°N has not weakened from 1963 to 2017 although substantial variability exists at all latitudes.

Figure 10 of 39

Figure S5. Sulfate aerosols and sulfur limit on emissions, p.p.t.v. = parts per trillion by volume.\*\*





## AGU Advances

Commentary | [Open Access](#) | [©](#) | [i](#)

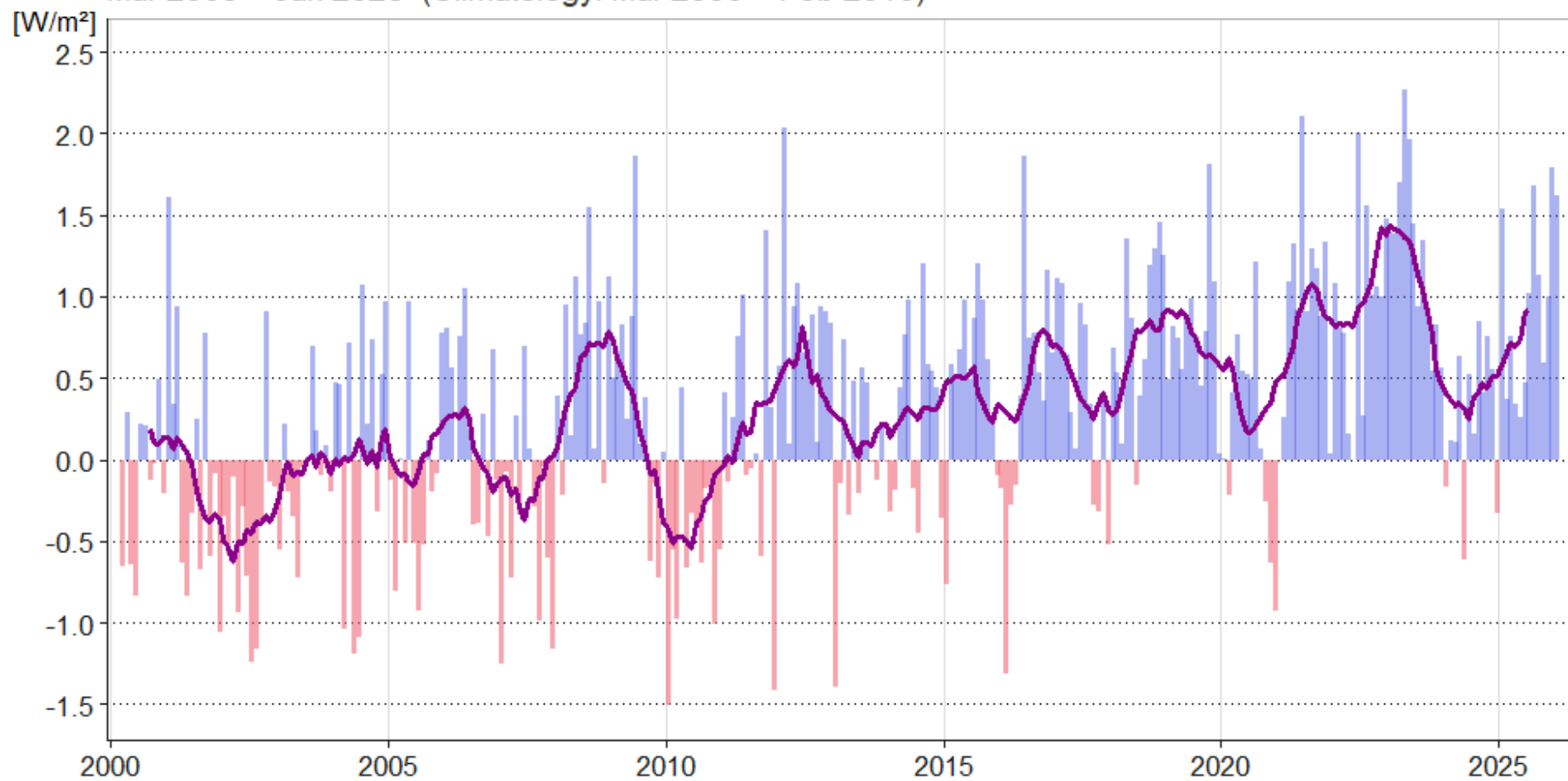
### Earth's Energy Imbalance More Than Doubled in Recent Decades

Thorsten Mauritsen , Yoko Tsushima, Benoit Meyssignac, Norman G. Loeb, Maria Hakuba, Peter Pilewski, Jason Cole, Kentaroh Suzuki, Thomas P. Ackerman, Richard P. Allan ... [See all authors](#) ▾

First published: 10 May 2025 | <https://doi.org/10.1029/2024AV001636> | Citations: 3

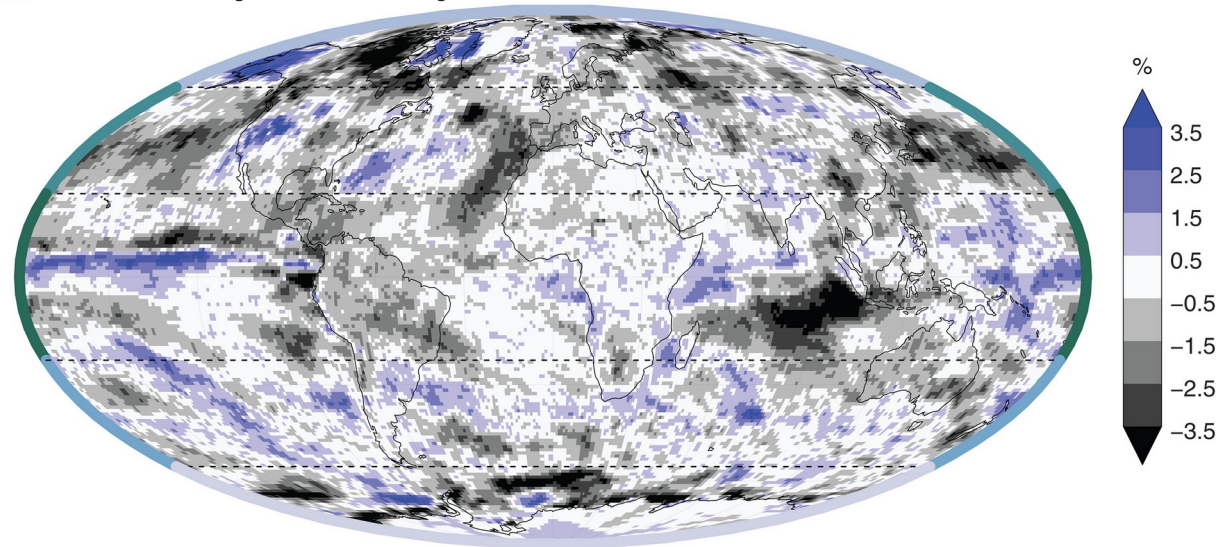
# Global Earth's Energy Imbalance: monthly anomaly & 12-month running mean

Mar 2000 ~ Jan 2026 (Climatology: Mar 2000 ~ Feb 2010)



Data Source: CERES EBAF-TOA Ed4.2.1

## A CERES Planetary Albedo Anomaly 2023

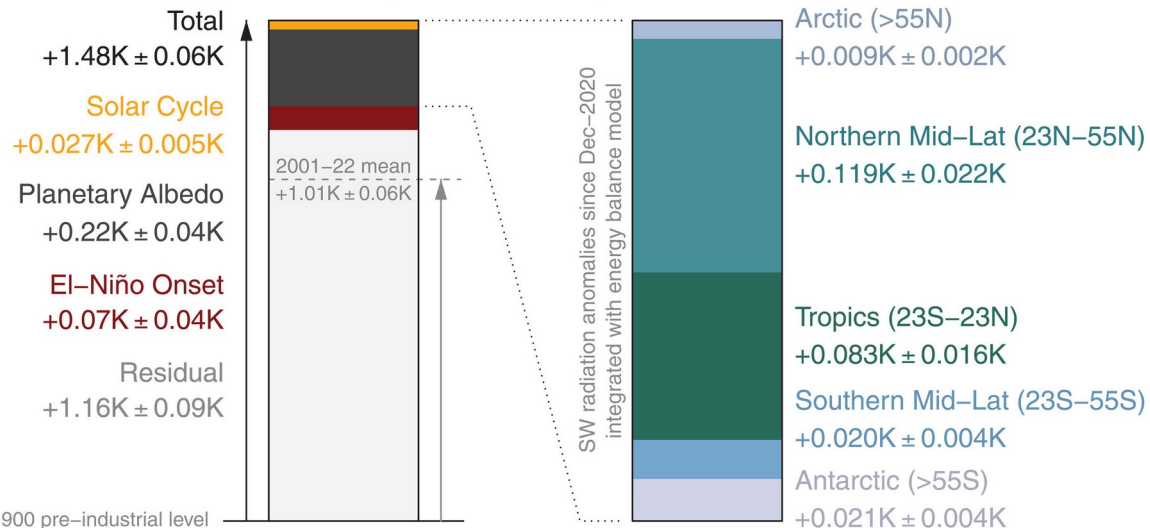


Nierównowaga energetyczna narasta nie tylko dlatego, że **rośnie efekt cieplarniany**,

ale także dlatego, że **spada albedo** naszej planety,

gdyż **maleje zawartość aerozolu**,  
**zmieniają się chmury**,  
**zmniejsza się powierzchnia lodu**.

## B Contributions to Global-Mean Temperature Anomaly 2023



**Figure 24.** Global temperature relative to 1880–1920.  
Edges of the predicted post-2010 accelerated warming  
rate (see ...

