

Fizyka Procesów Klimatycznych

Wykład 5

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

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 ≈ 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 $\approx 0.028 \text{W/m}^2$

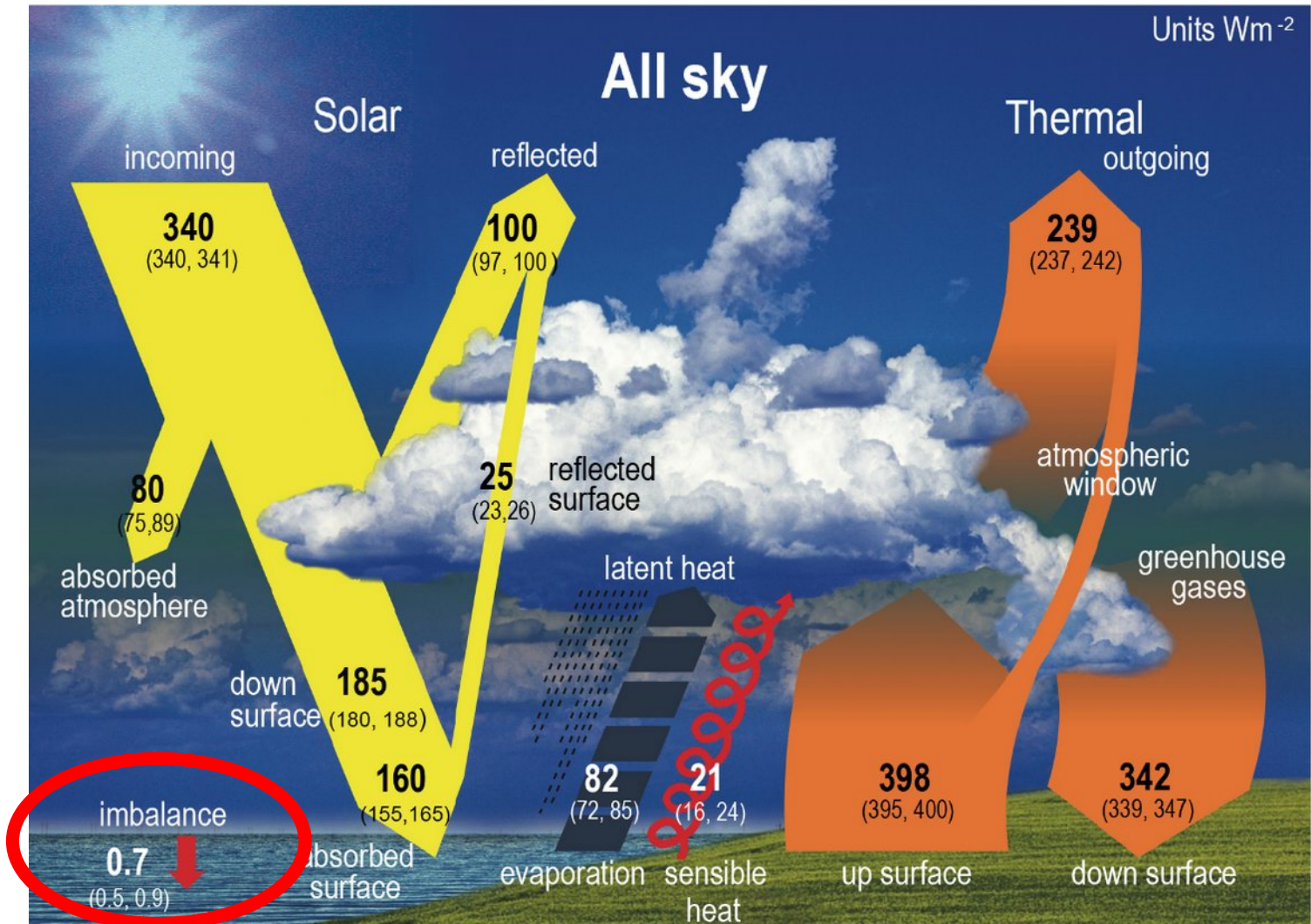
PODSTAWOWE WŁASNOŚCI SYSTEMU KLIMATYCZNEGO

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: H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , NO_x i wiele innych



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

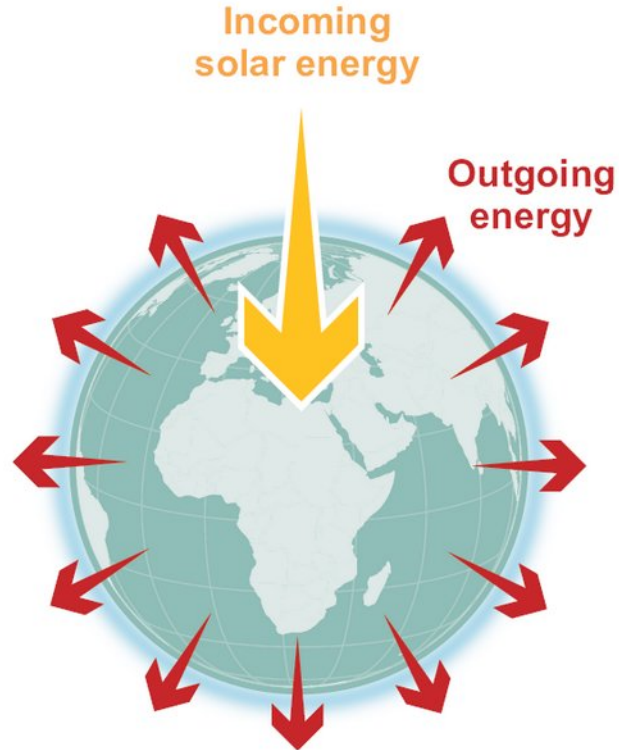
W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

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

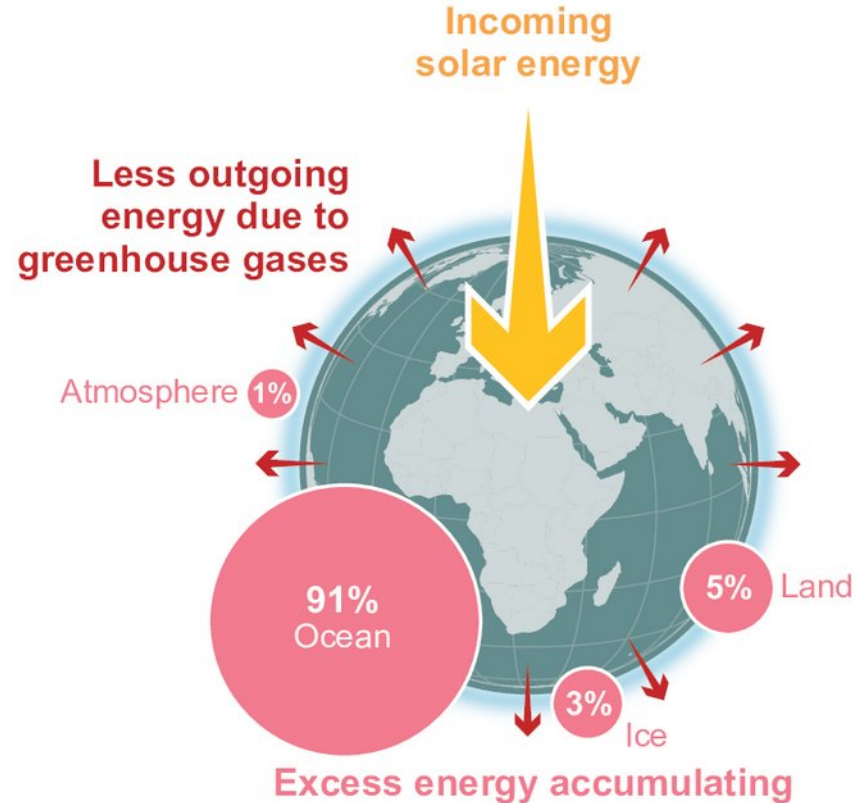
FAQ 7.1: The Earth's energy budget and climate change

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.**

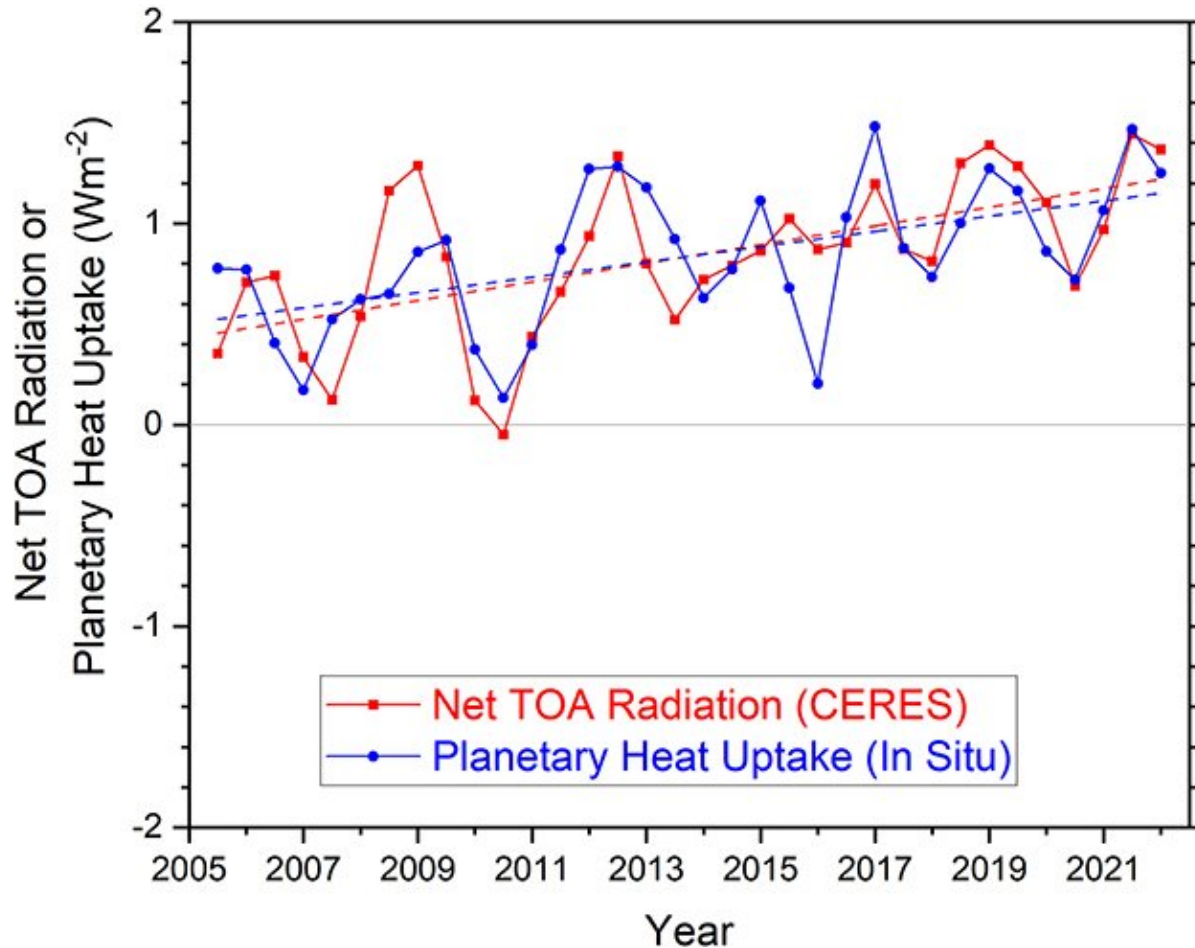
Stable climate: in balance



Today: imbalanced

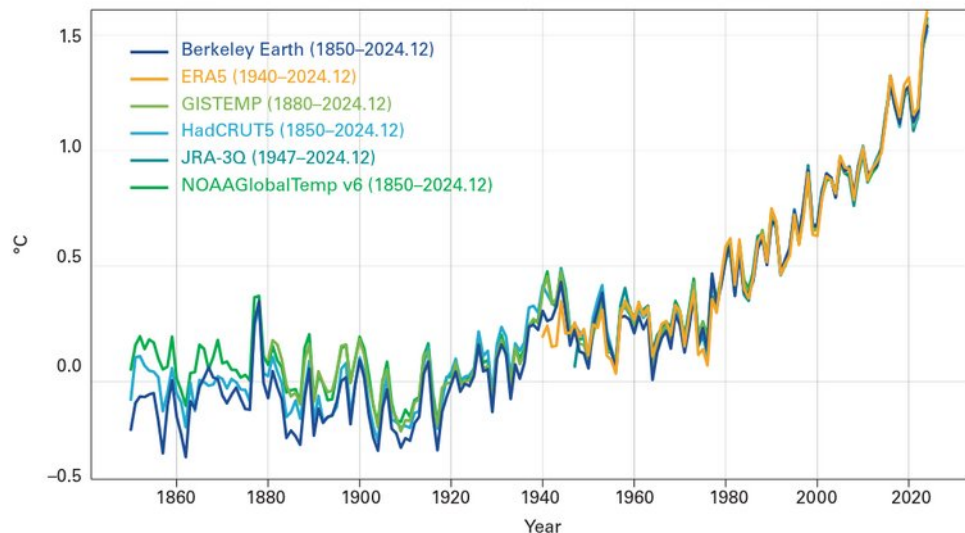


Nierównowaga energetyczna narasta

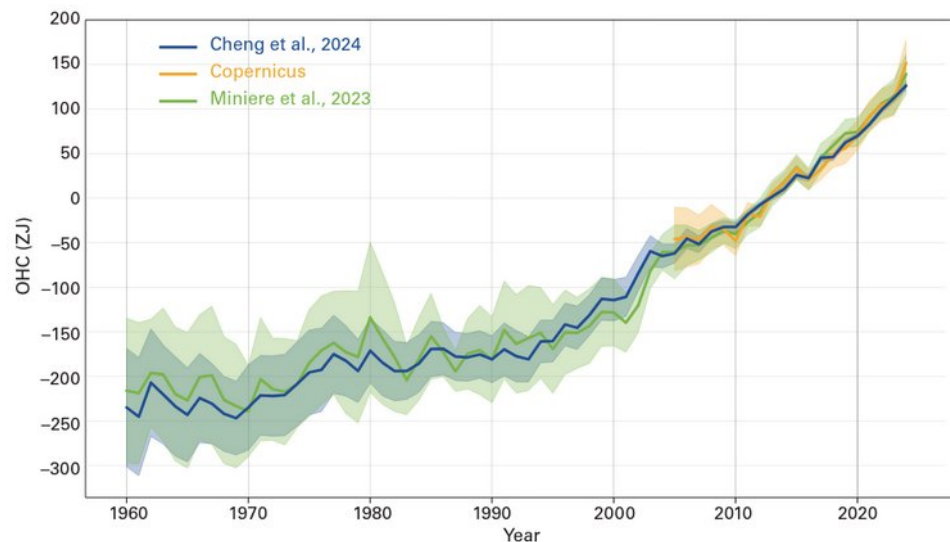


Schmidt GA, et al., 2023, CERESMIP: a climate modeling protocol to investigate recent trends in the Earth's Energy Imbalance. *Front. Clim.* 5:1202161. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1202161>

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

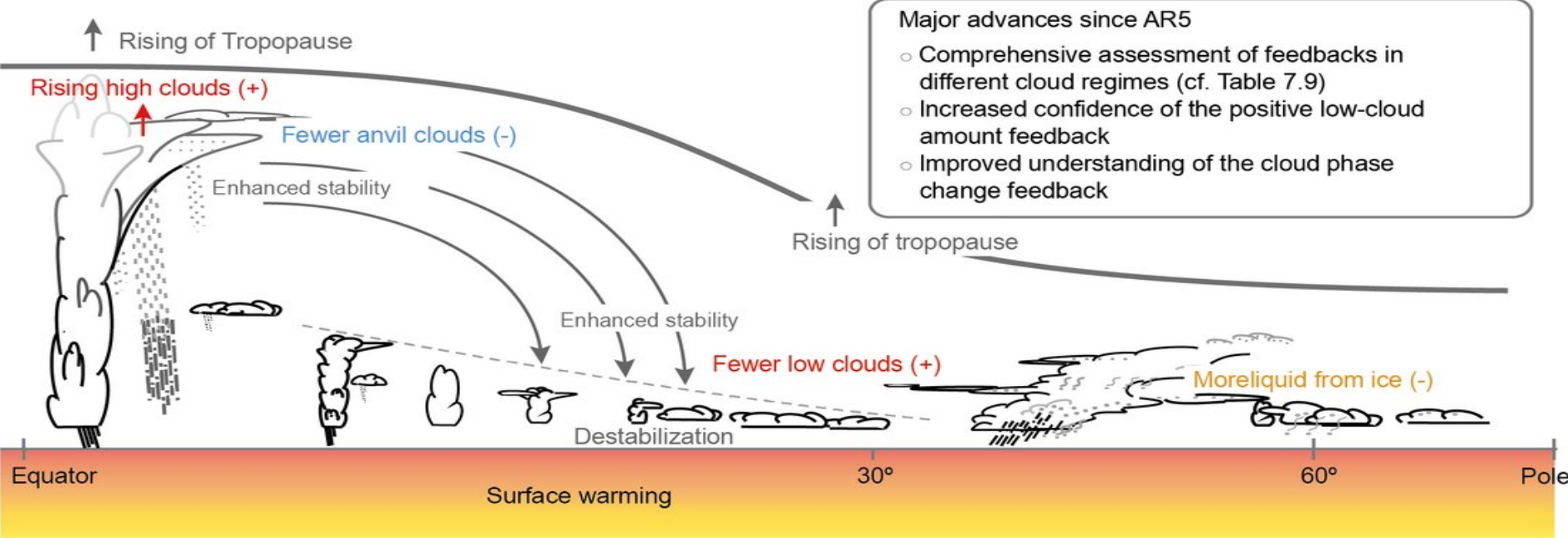


Zmiany temperatury powierzchni Ziemi od 1850,

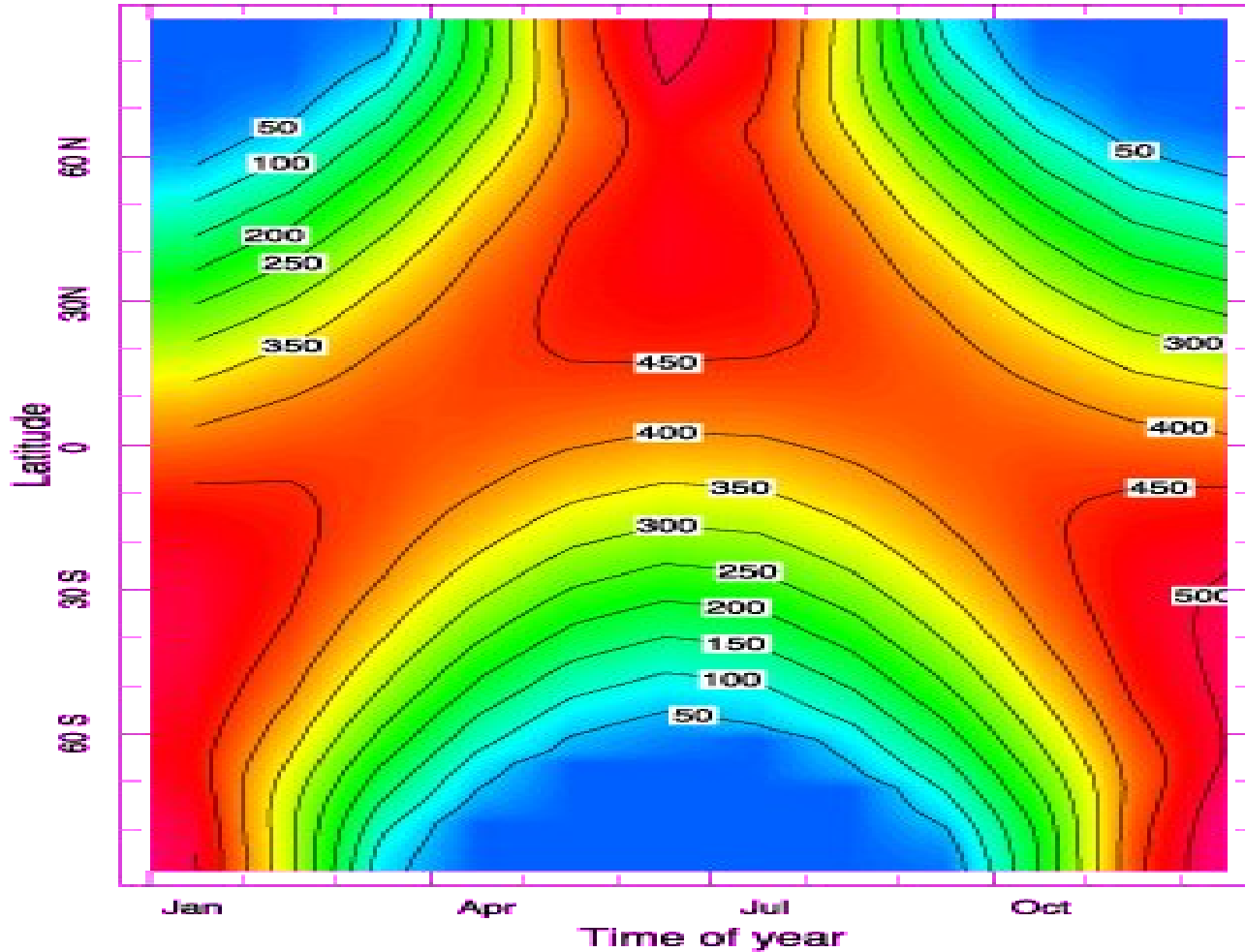


Zmiany zawartości energii w wodach oceanicznych od 1960.

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:

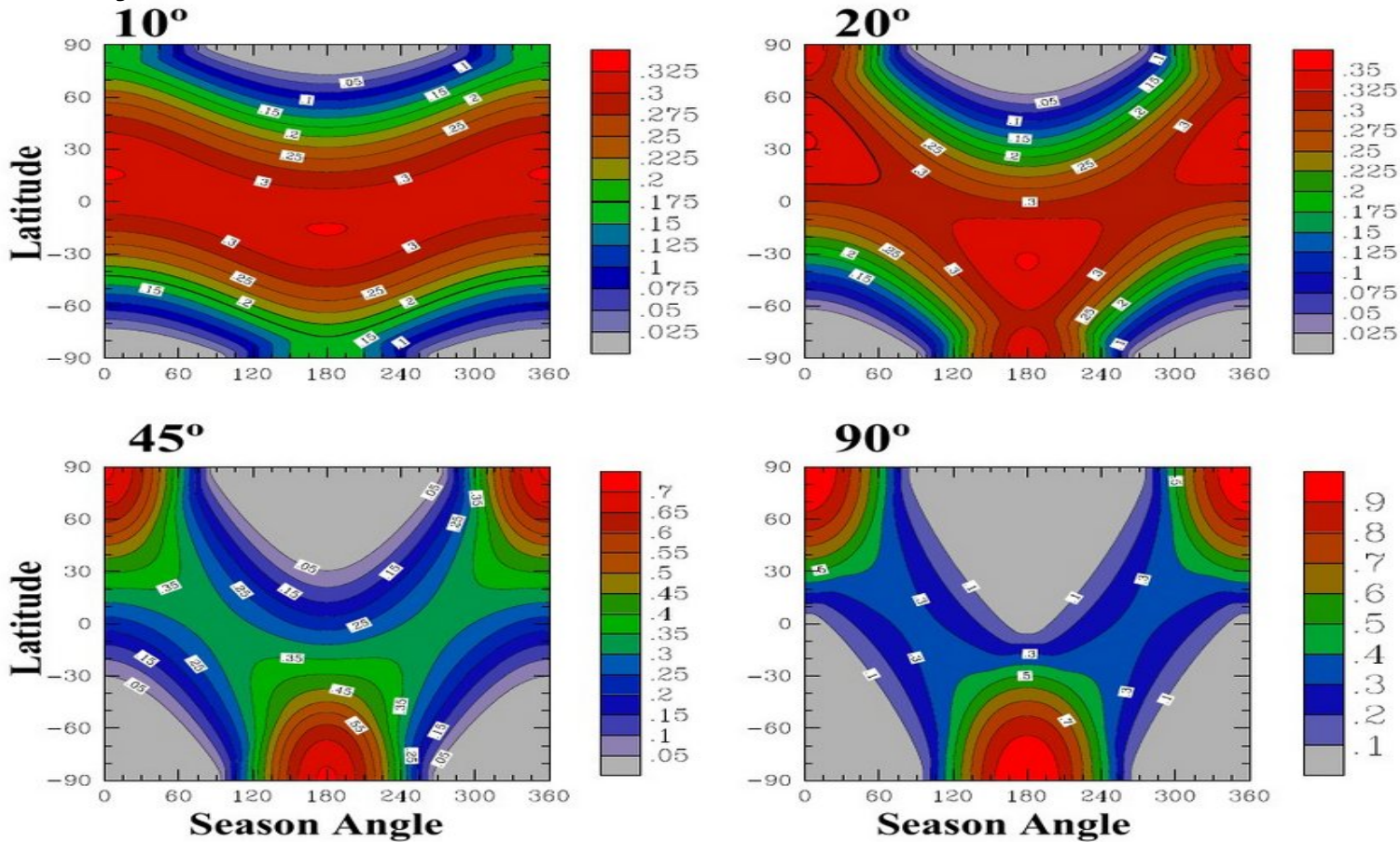


Fig. 7.5: The seasonal and latitudinal distribution of daily-mean flux factor for four different values of the obliquity. In these plots, a circular orbit has been assumed. To obtain the daily mean energy flux incident on each square meter of the planet's surface, one multiplies the flux factor by the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

MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

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

Model Input

CO₂ (ppm)

CH₄ (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

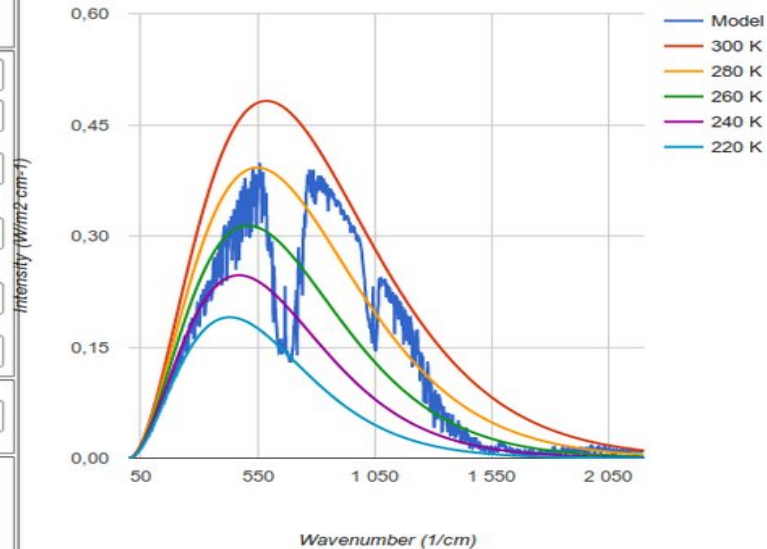
Locality

Altitude (km)

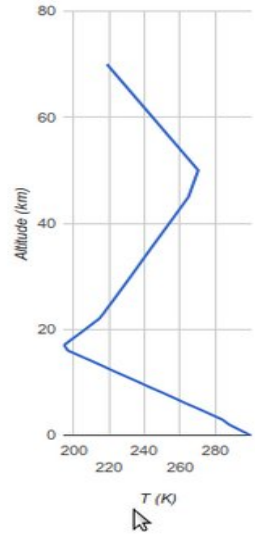
Model Output

Upward IR Heat Flux **298.52 W/m²**

Ground Temperature **299.7 K**



Wavenumber



T (K)

MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

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

Model Input

CO₂ (ppm)

CH₄ (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

Locality

Altitude (km)

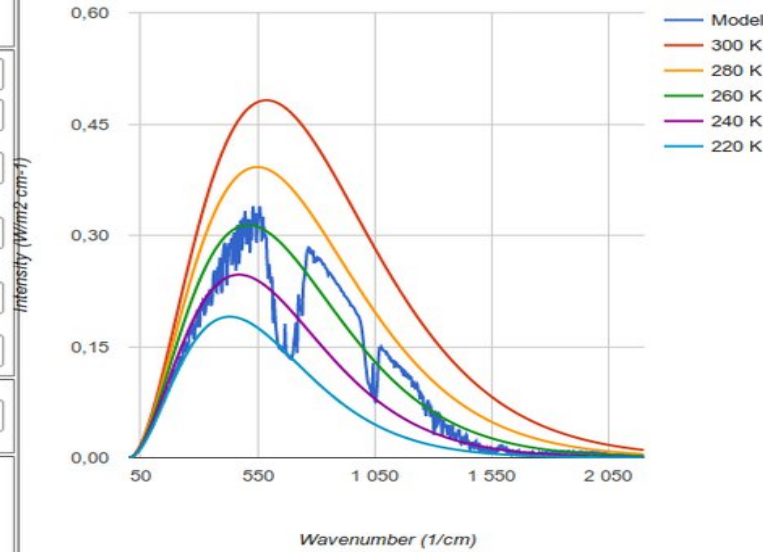
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

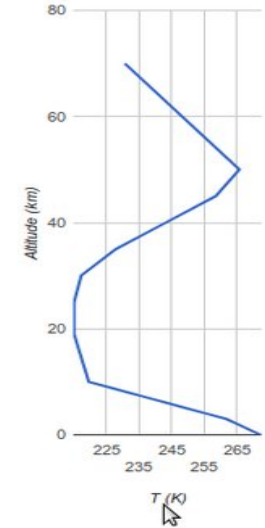
Model Output

Upward IR Heat Flux **235.217** W/m²

Ground Temperature **272.2** K



Wavenumber



T (K)

MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

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

Model Input

CO₂ (ppm)

CH₄ (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

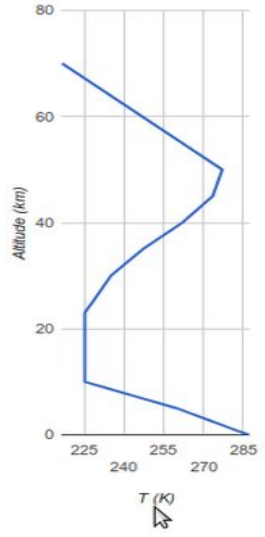
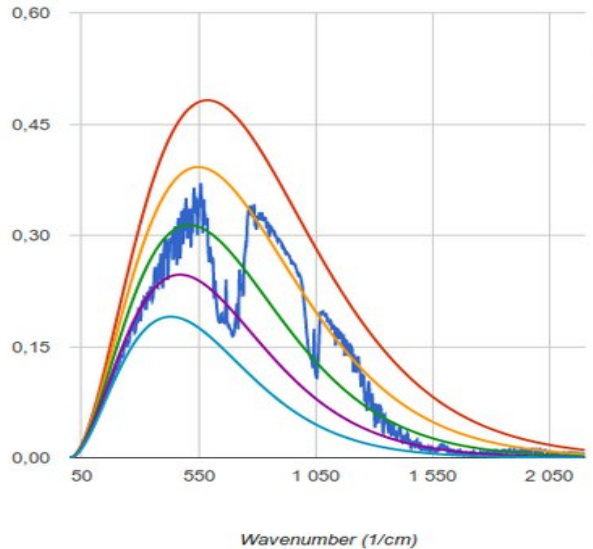
Locality

Altitude (km)

Model Output

Upward IR Heat Flux **270.731** W/m²

Ground Temperature **287.2** K



MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

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

Model Input

CO₂ (ppm)

CH₄ (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

Locality

Altitude (km)

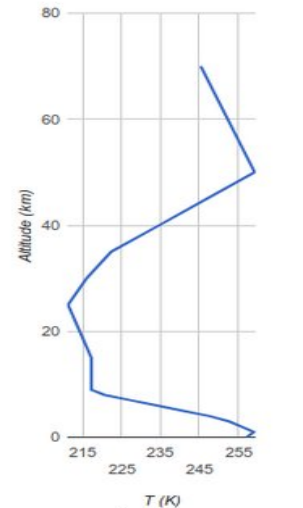
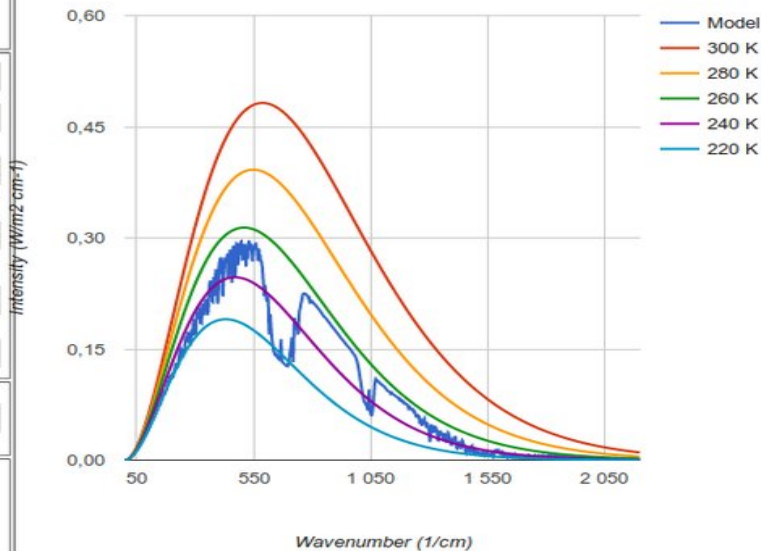
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

Model Output

Upward IR Heat Flux **202.059** W/m²

Ground Temperature **257.2** K

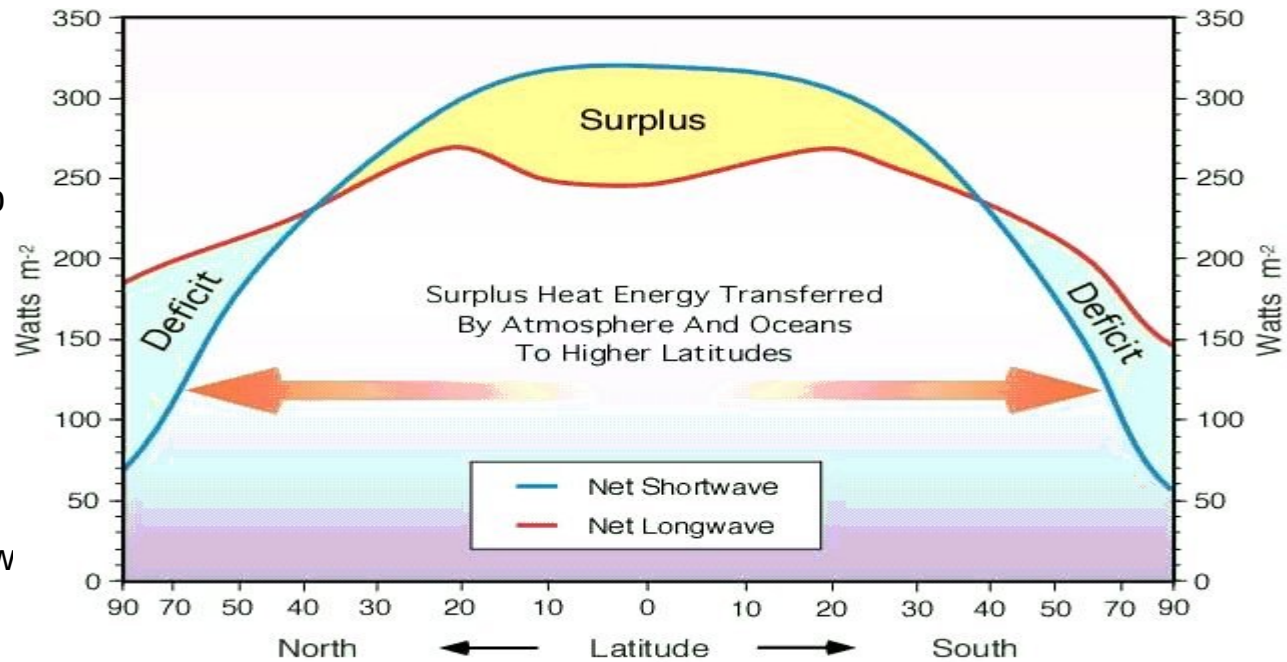


Bilans promieniowania - dopływu i odpływu ciepła – w skali całej planety w stanie stacjonarnym jest bliski równowagi.

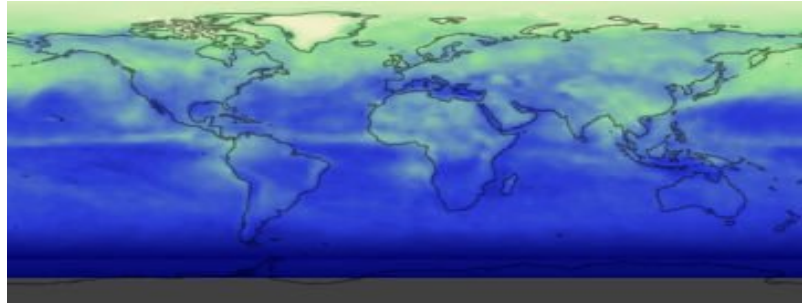
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

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).

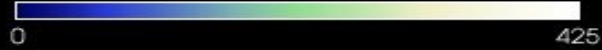
Mechanizmy transferu energii za pośrednictwem promieniowania wraz procesami redystrybucji energii kształtują pogodę i klimat (wieloletnie statystyki pogody).



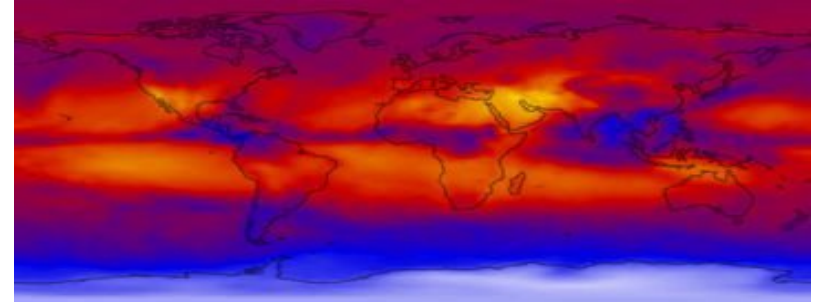
Bilans promieniowania słonecznego i podczerwonego w zależności od szerokości geograficznej. Tam gdzie występuje nadwyżka (Surplus) promieniowania słonecznego planeta ogrzewa się (średnio) wskutek pochłaniania promieniowania. Tam gdzie przeważa emisja promieniowania podczerwonego (Deficit), przeważa chłodzenie.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



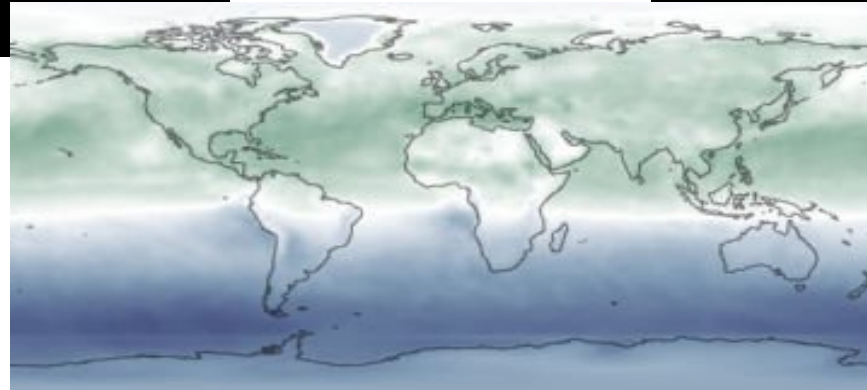
Reflected Solar Radiation (W/m^2)



Przykład:
LIPIEC 2005
- zima na półkuli
południowej.



Emitted Heat Radiation (W/m^2)



Net Radiation (W/m^2)



Problem rozkładu lądów:

Zonal Mean Surface Temperature, 1970-2000

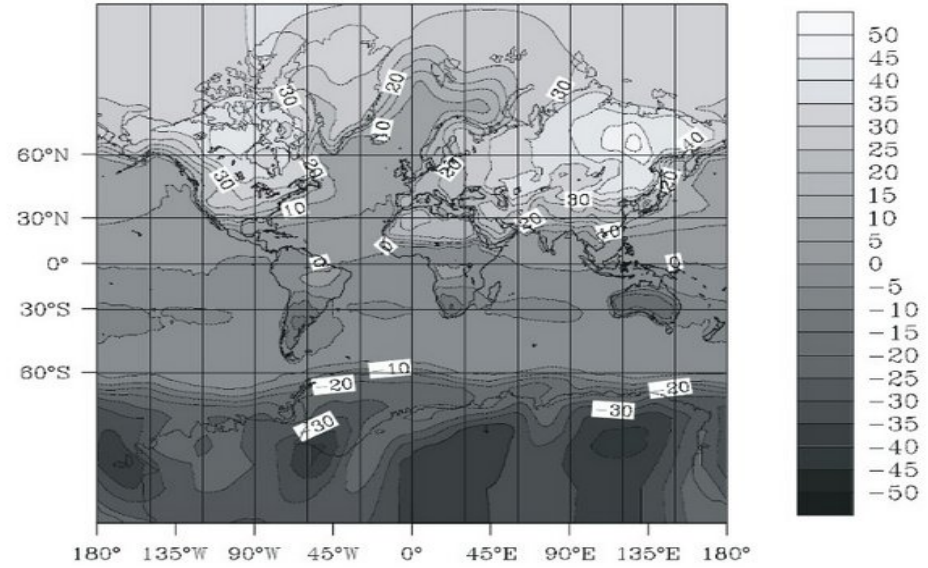
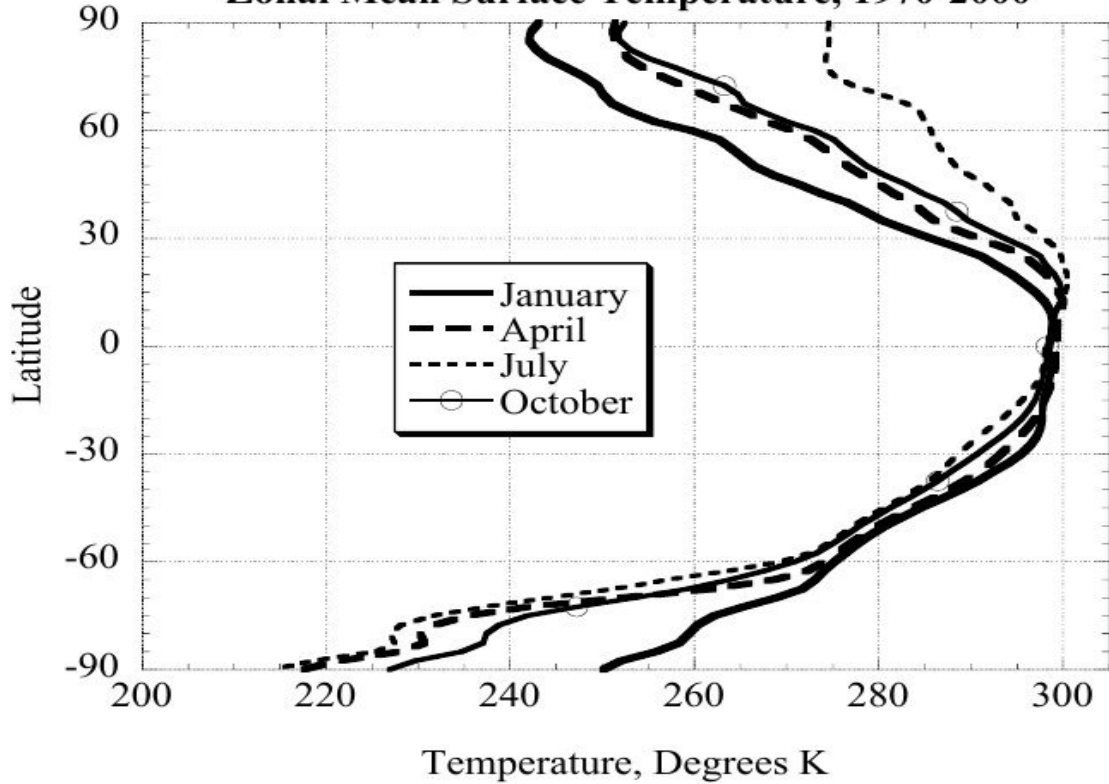


Figure 7.2: Map of July-January surface air temperature difference.

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.

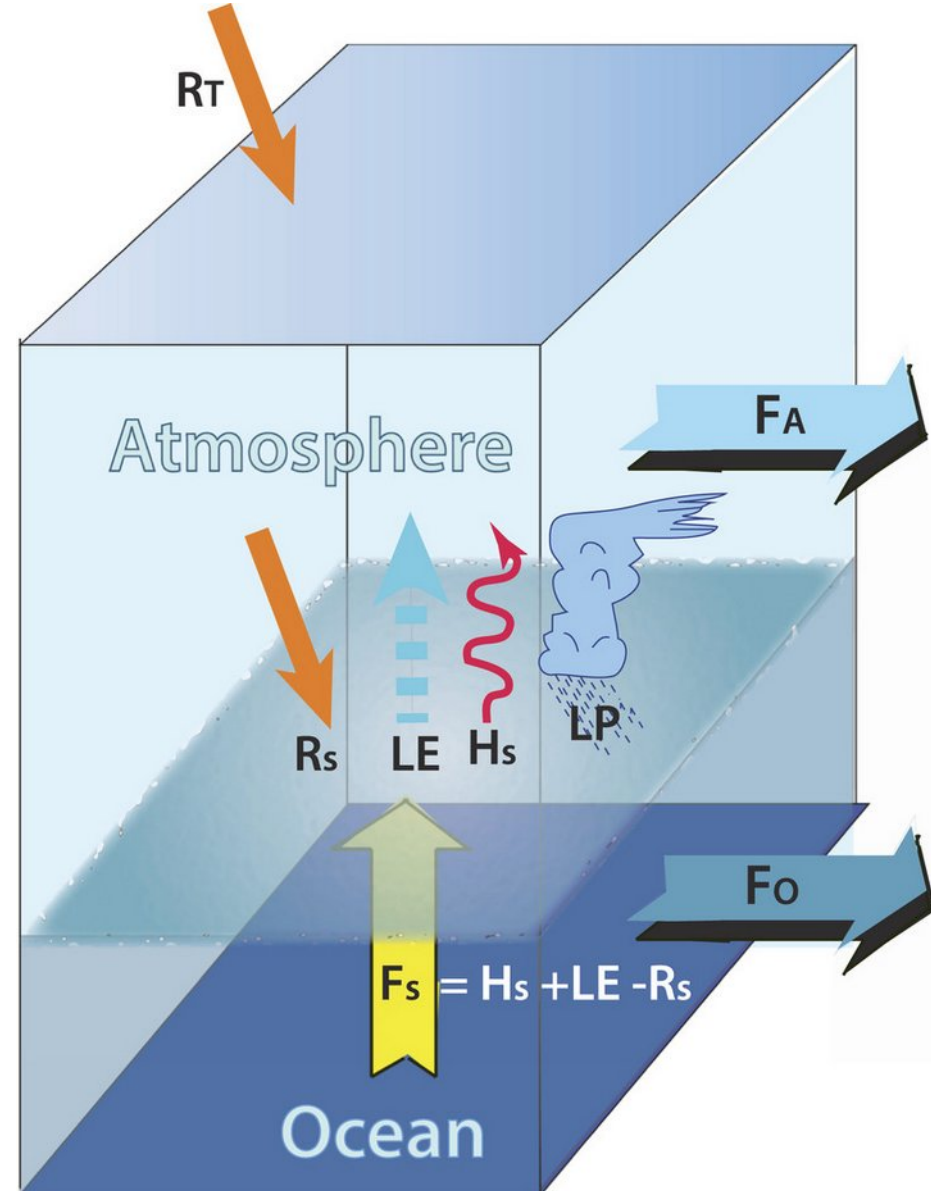
Procesy związane z absorpcją i emisją promieniowania (ochładzanie i ogrzewanie) oraz przenoszeniem ciepła w postaci jawnej i utajonej zachodzą w różnych skalach przestrzennych i czasowych:

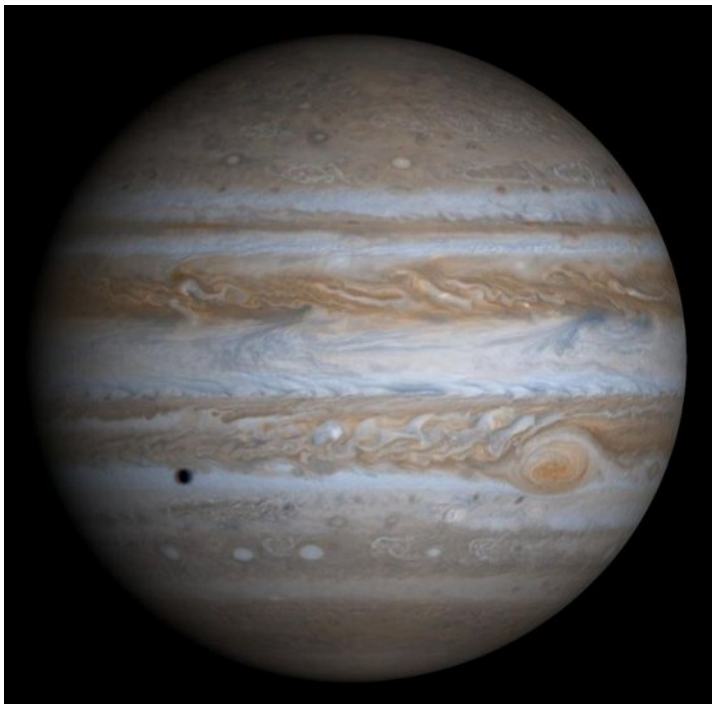
- przy powierzchni Ziemi w przeciągu kilku minut (gdy chmura zasłania słońce przestaje dopływać energia słoneczna),

- 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),

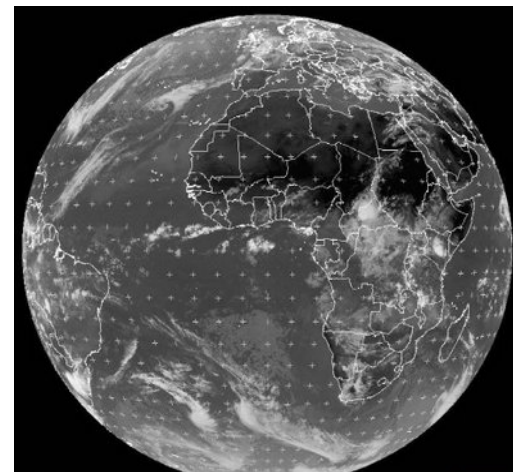
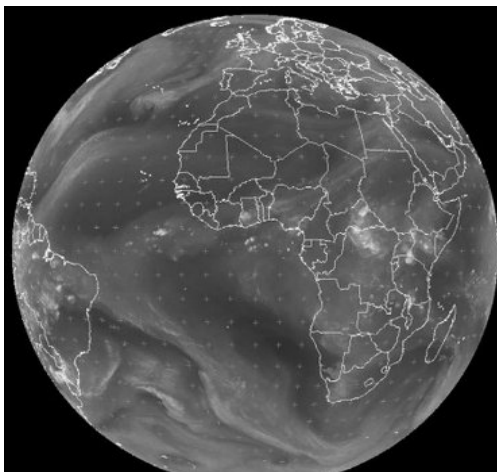
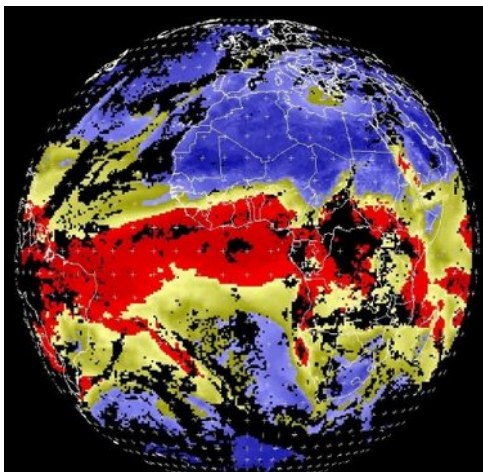
- zmiany pogody w skali dni i tygodni,

- zmienność warunków atmosferycznych z roku na rok.

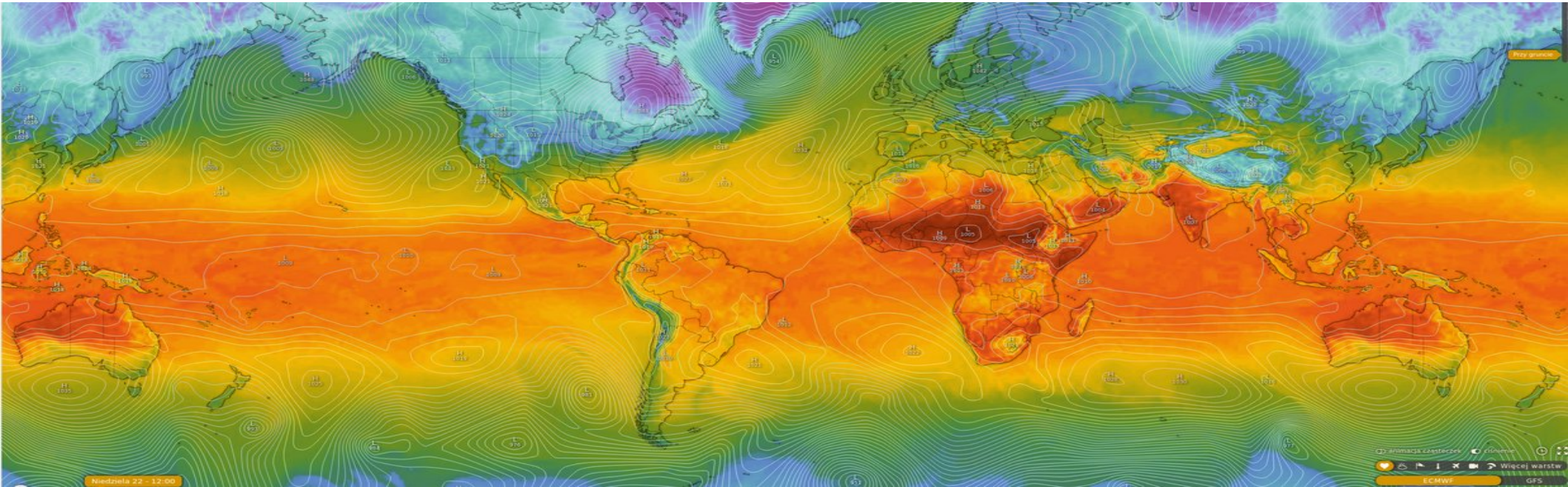




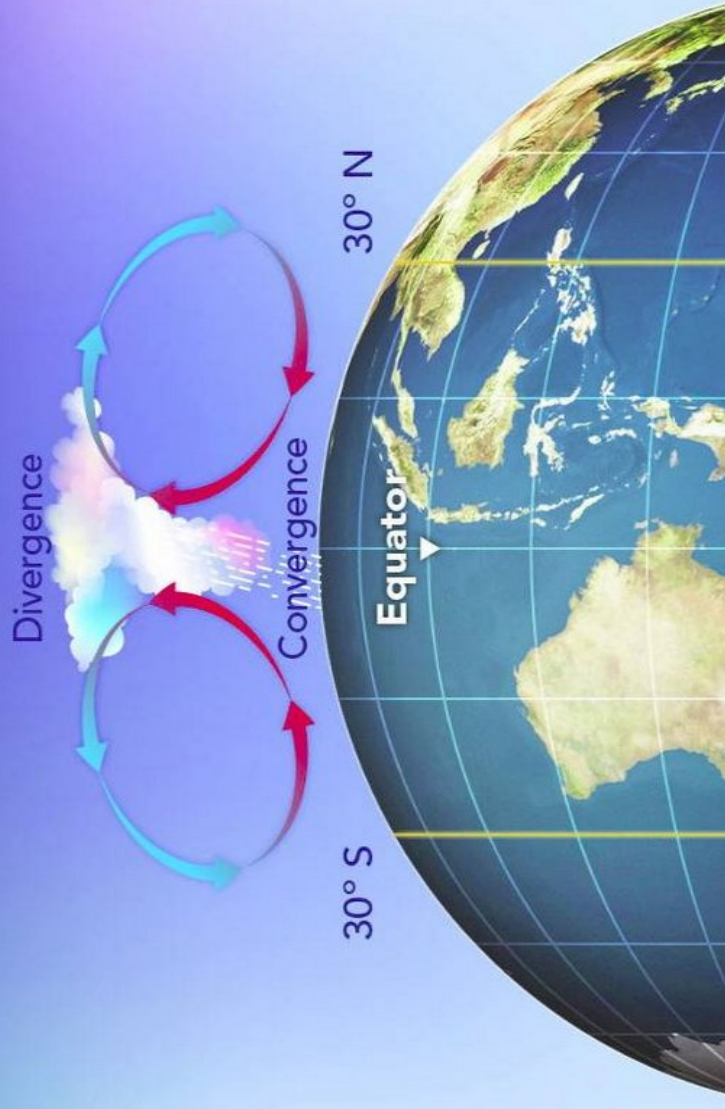
Atmosfery innych planet też mają komórki cyrkulacyjne, czasem lepiej widoczne niż w przypadku Ziemi.



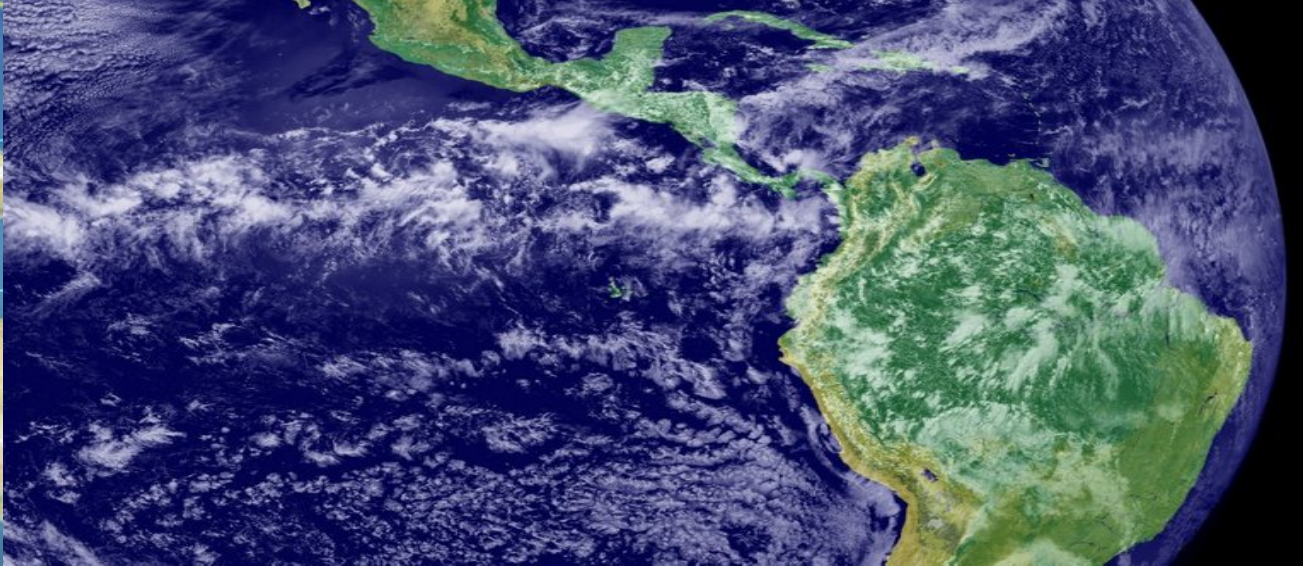
Z kolei w atmosferze na równiku nie ma wyżów i niżów!



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



Komórka Hadleya i strefa zbieżności równikowej.



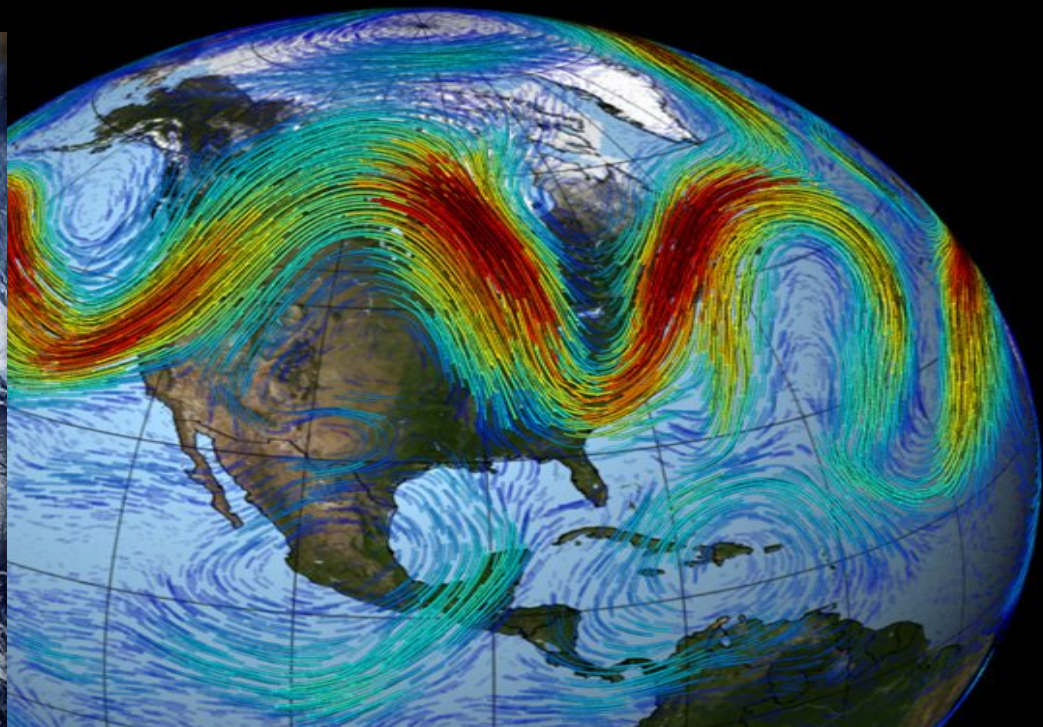
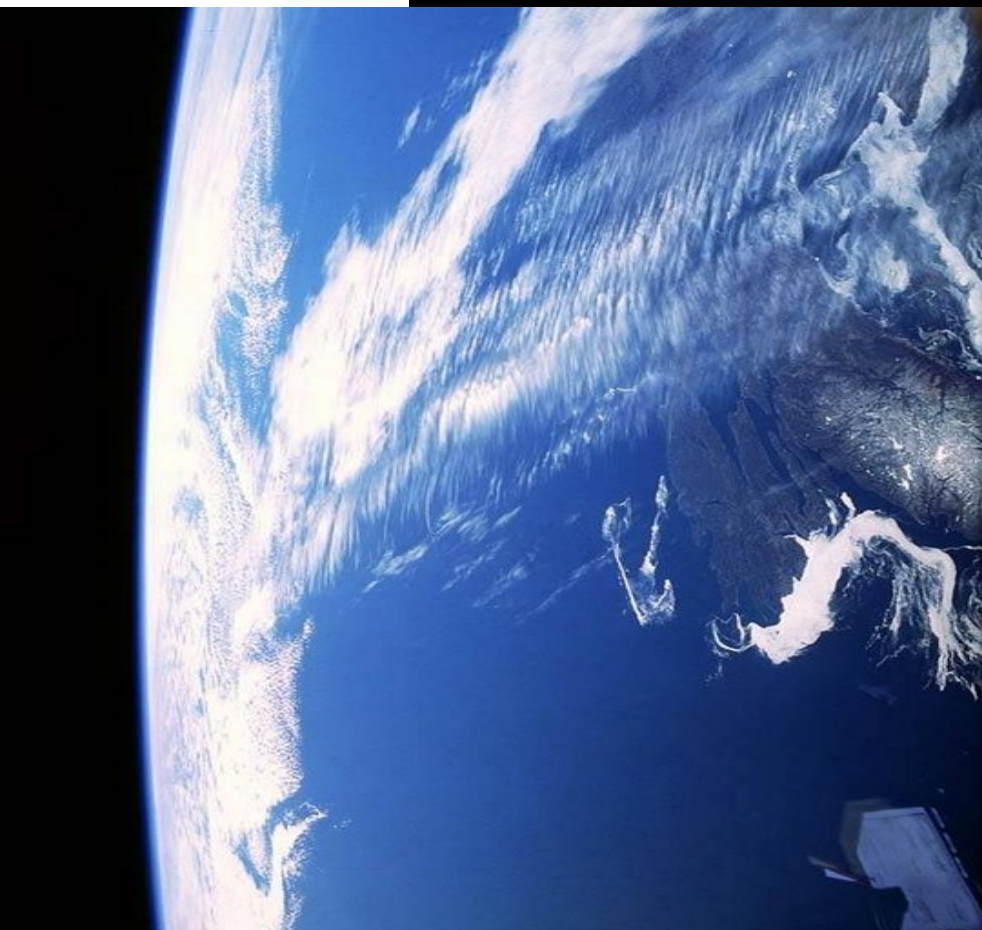
The Hadley circulation is driven mostly from the subtropics through cooling by transient baroclinic waves in storm tracks at mid-lats.

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.

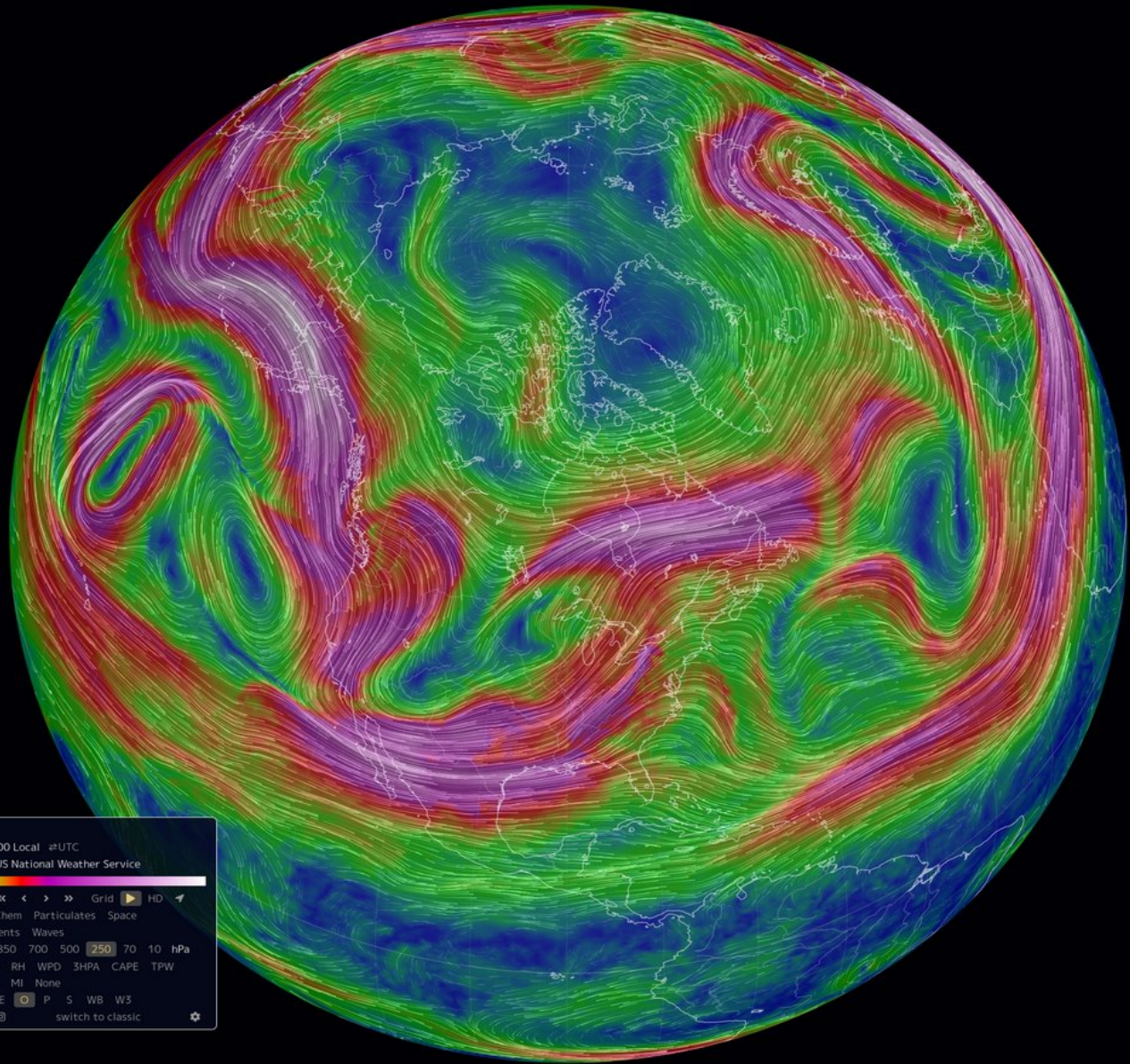
Tropical SSTs determine where the upward motion is favored, and the upward motion is driven by latent heating. But the moisture comes mostly from the subtropics, transported by the Hadley circulation itself.

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 HD

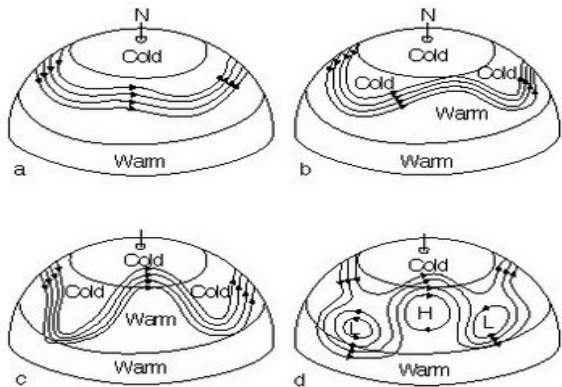
Mode | **Air** Ocean Chem Particulates Space

Animate | **Wind** Currents Waves

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

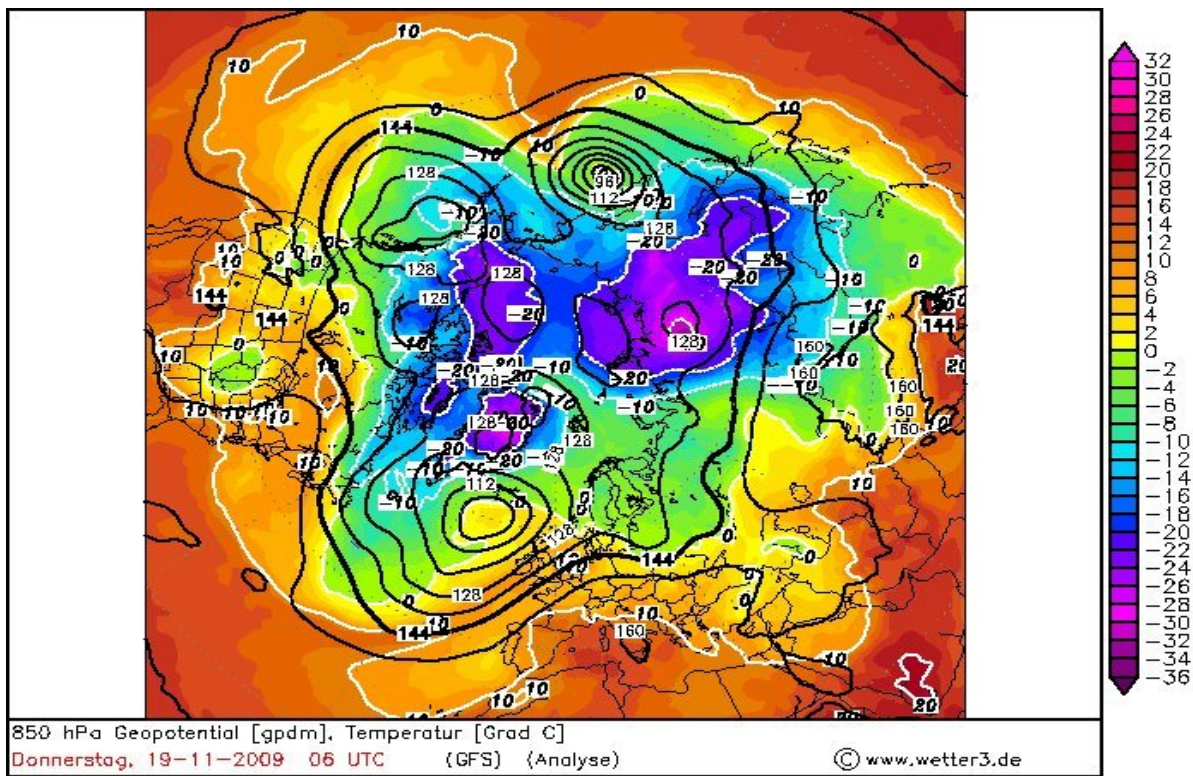
Overlay | **Wind** Temp RH WPD 3HPA CAPE TPW
TCW MSLP MI None

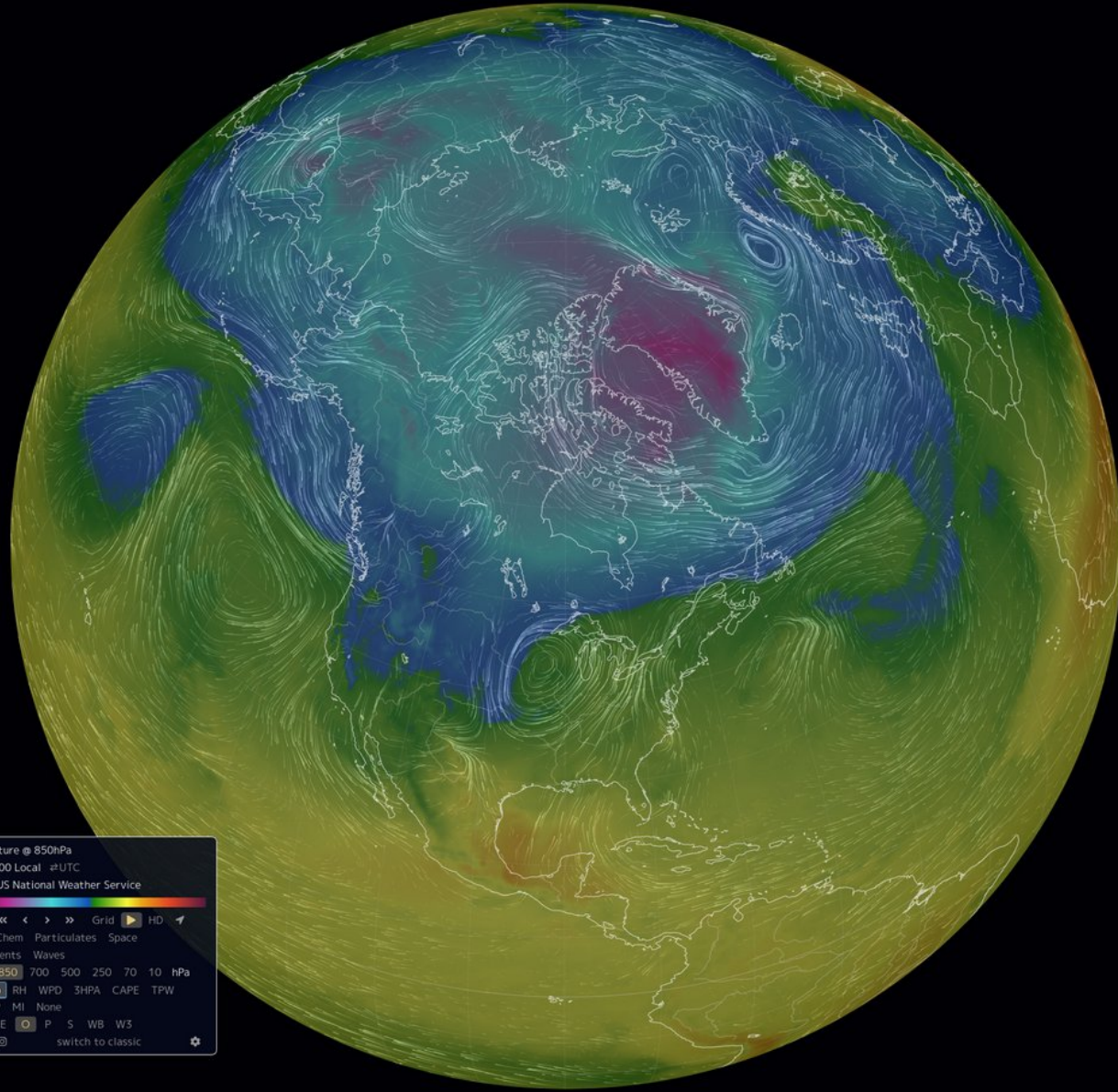
Projection | A CE E **O** P S WB W3
about switch to classic



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 @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 **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.

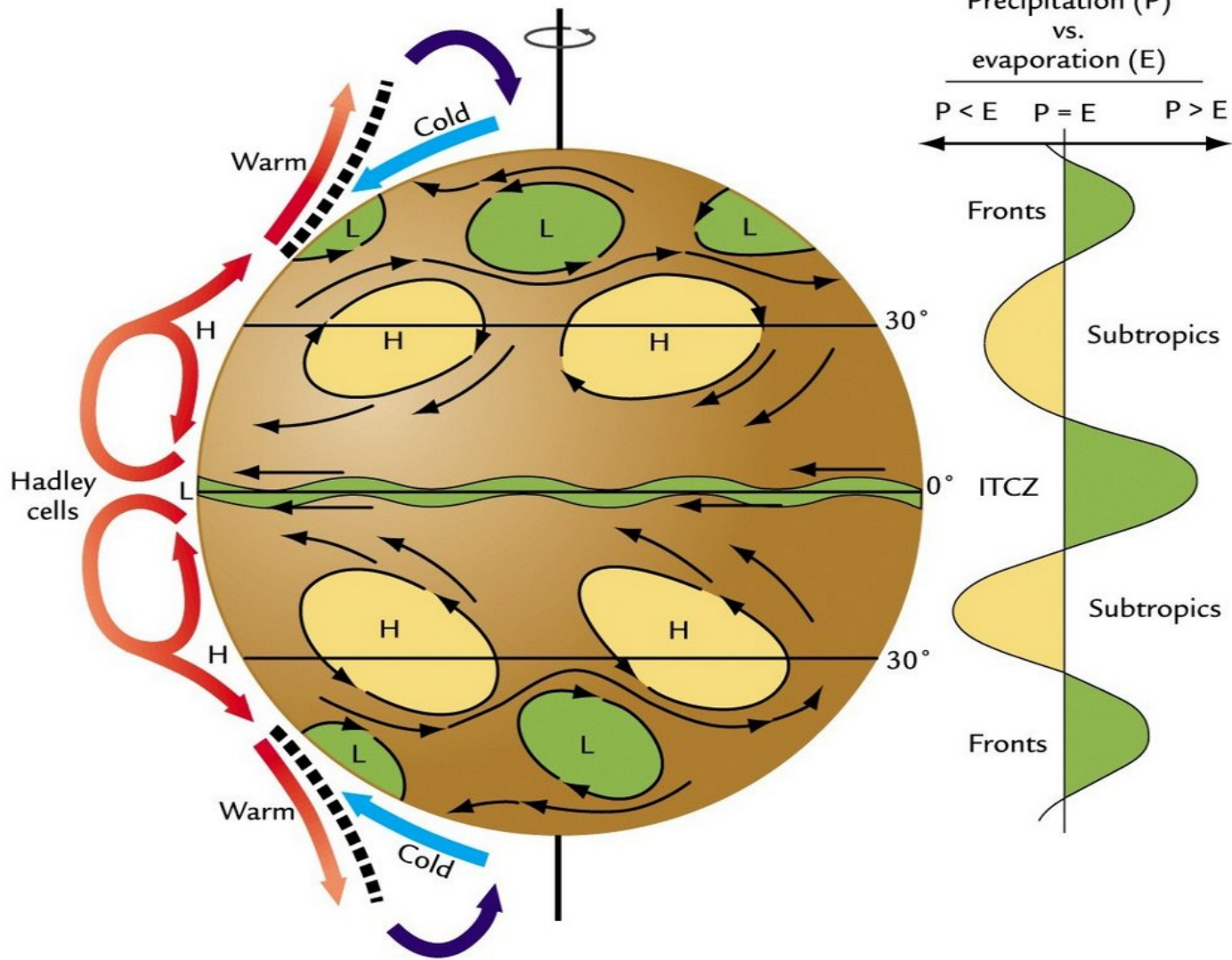
2. In extratropics:

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.

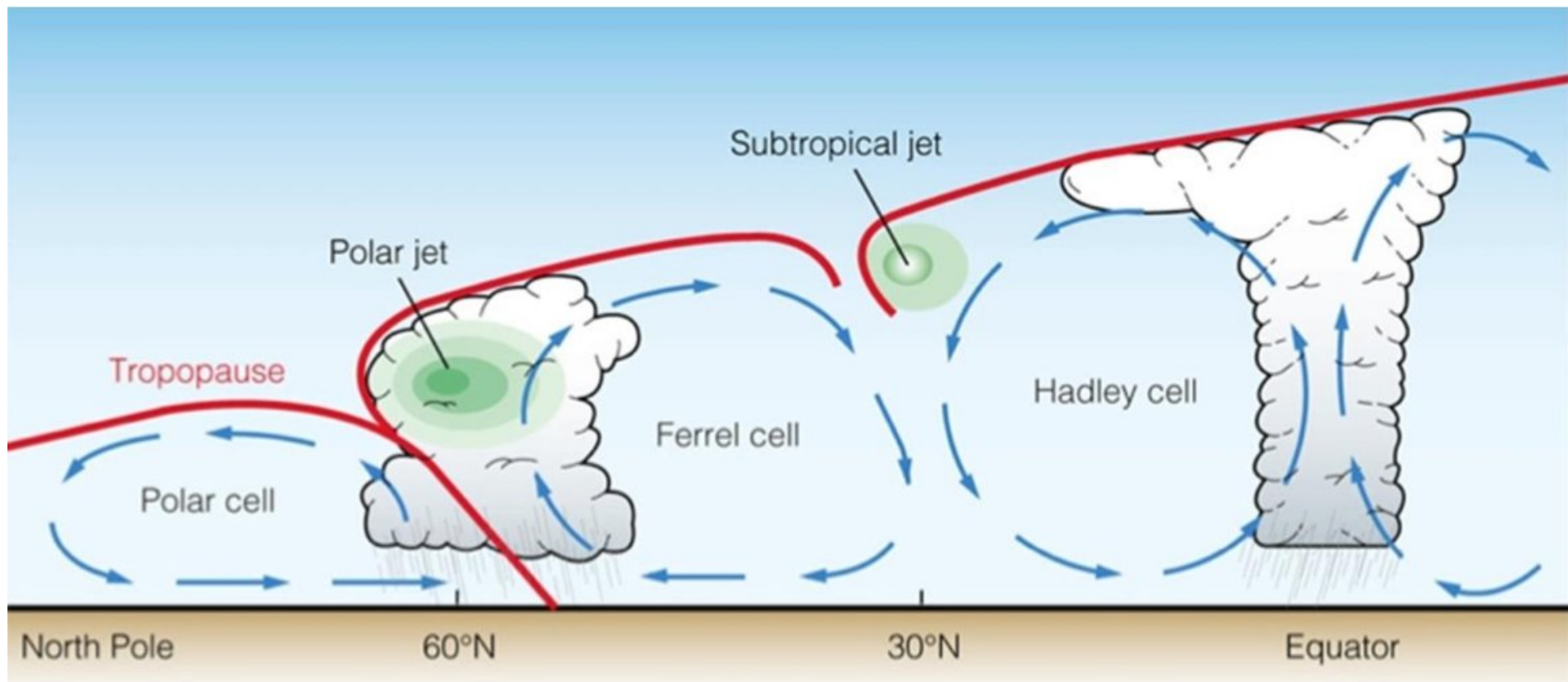
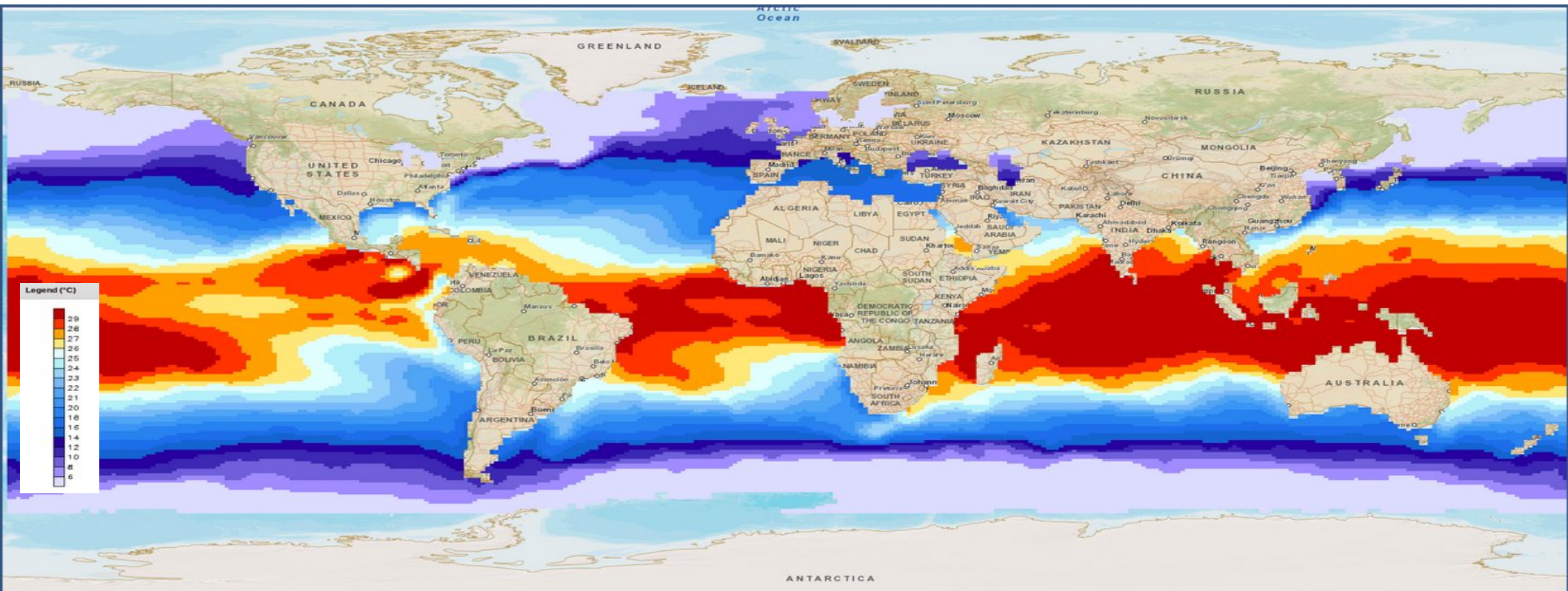


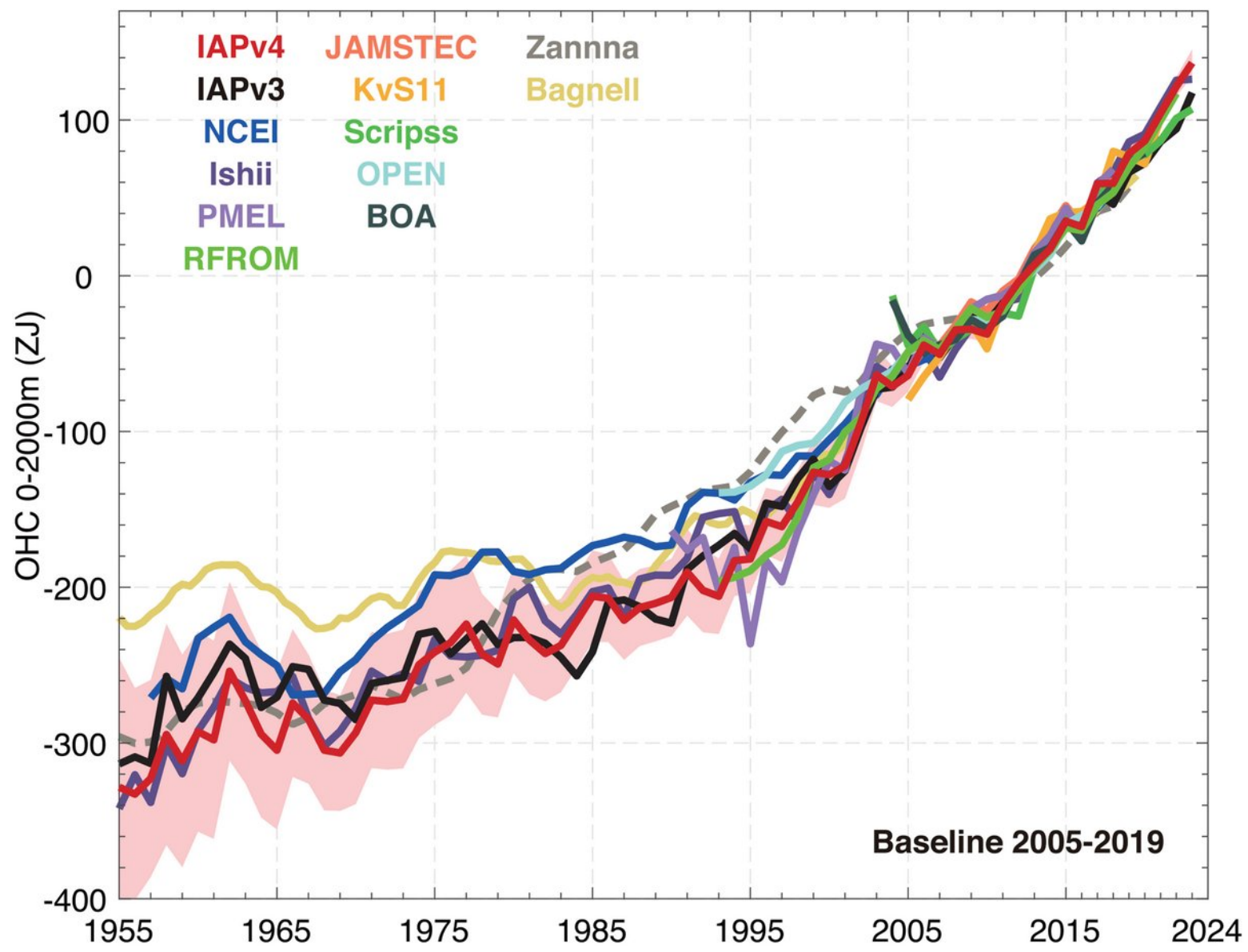
Fig. 1 Global atmospheric circulation. *Credit: Geophile pages.*

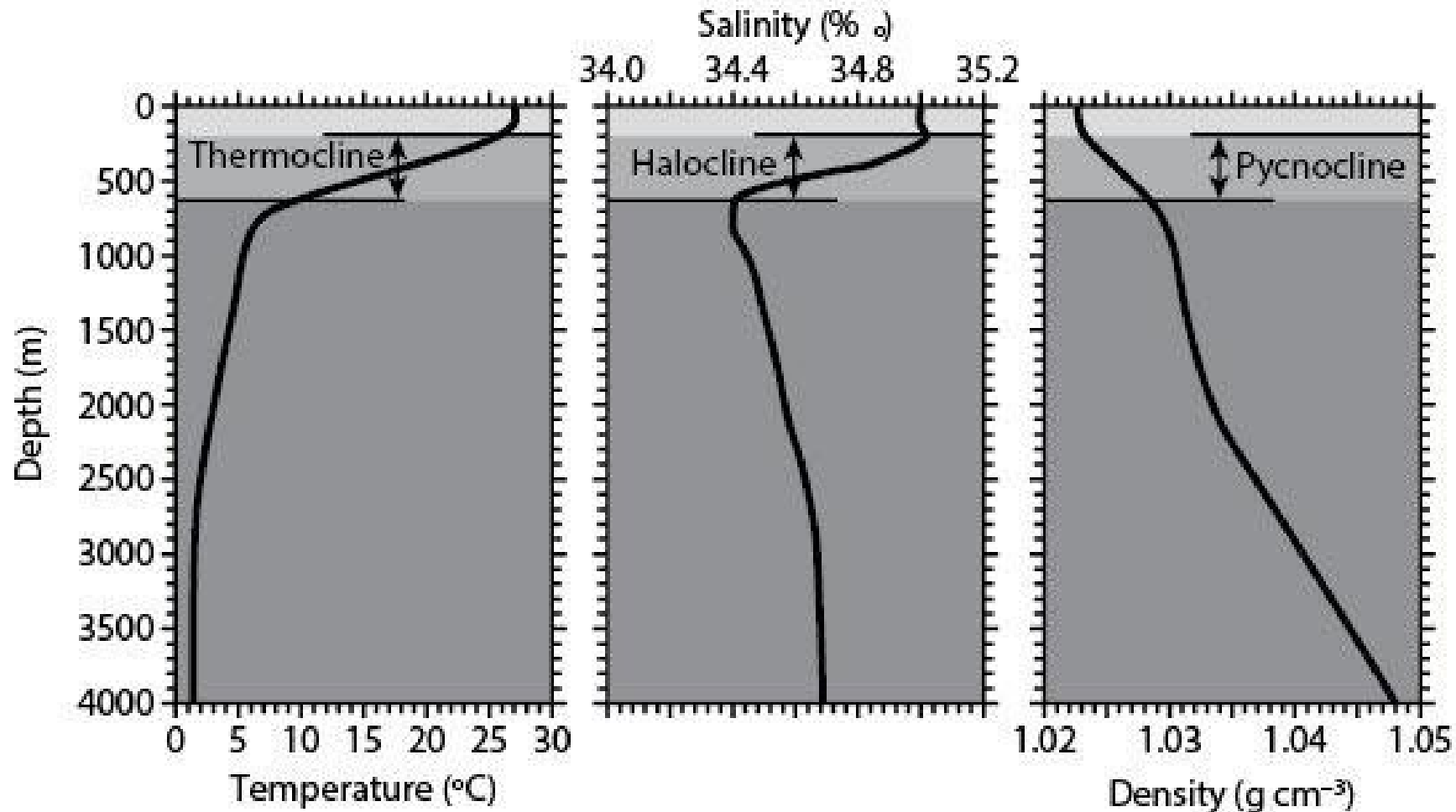
Temperatura powierzchni morza -SST (Sea Surface Temperature) – średnia tygodniowa, 04-11/03/2020.

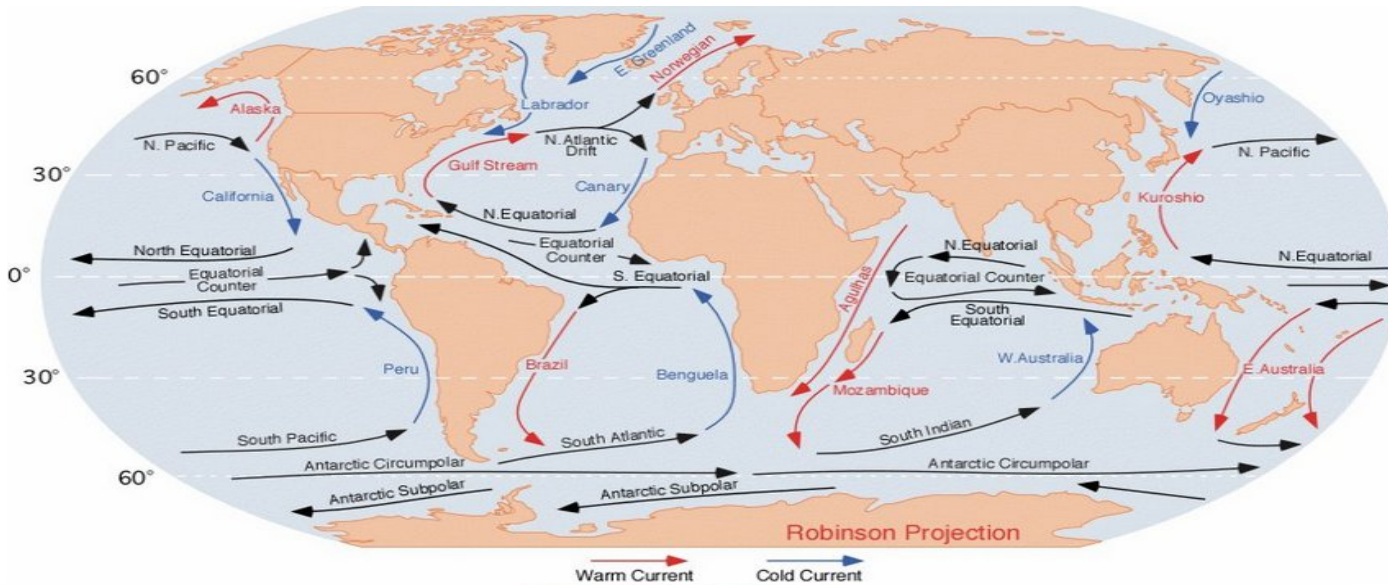
Widać znaczne odchylenia od strefowości.



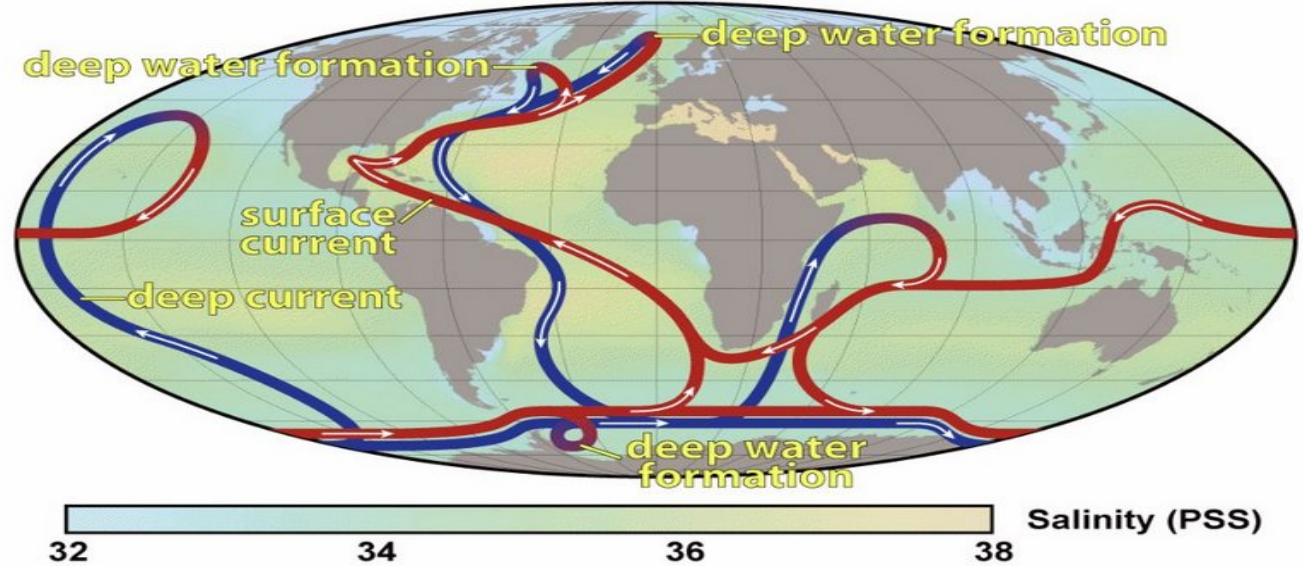
https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map_viewer/cpcgis.swf



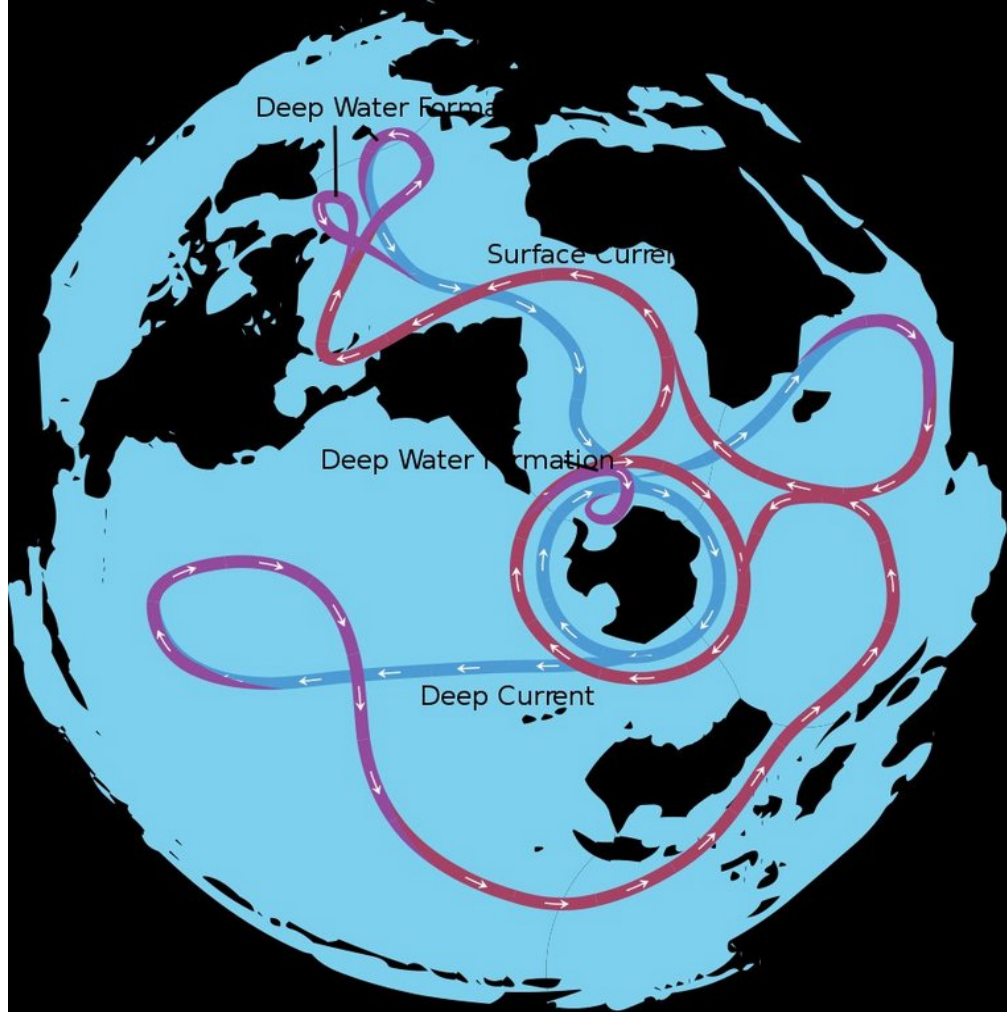




Powierzchniowe prądy morskie. Kolorami oznaczono względną temperaturę wody: czerwień - prąd ciepły, błękit - prąd chłodny.

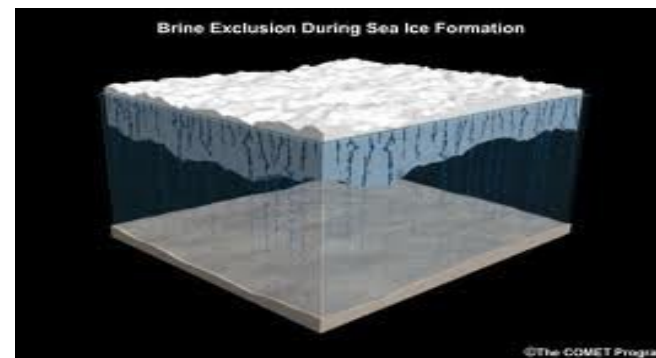


Cyrkulacja termohalinowa w oceanach, wpływająca na temperaturę i zasolenie wody w poszczególnych rejonach. Czerwonymi liniami oznaczono powierzchniowe prądy morskie (surface current), kształtowane przez wiatry. W miarę zbliżania się do biegunów, woda niesiona prądami powierzchniowymi stygnie i zaczyna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



www.meted.ucar.edu

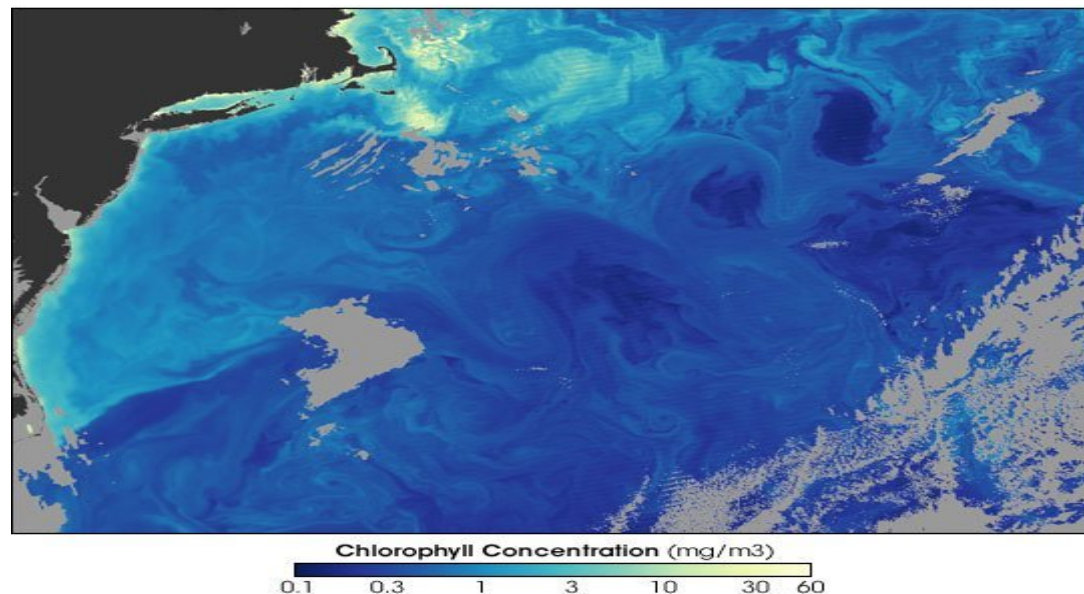
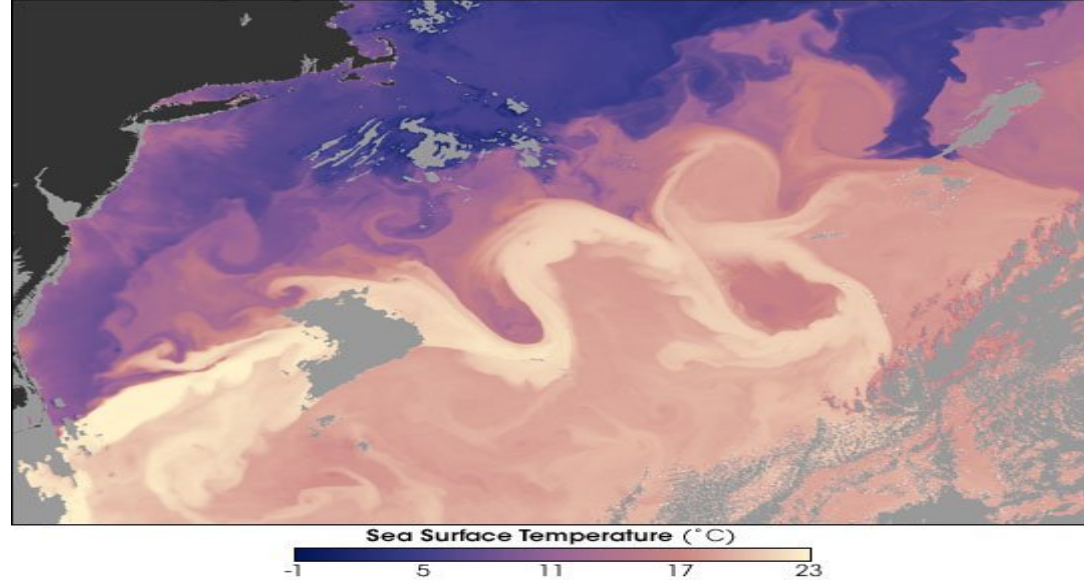
Cyrkulacja
termohalinowa:
„wielka pętla”

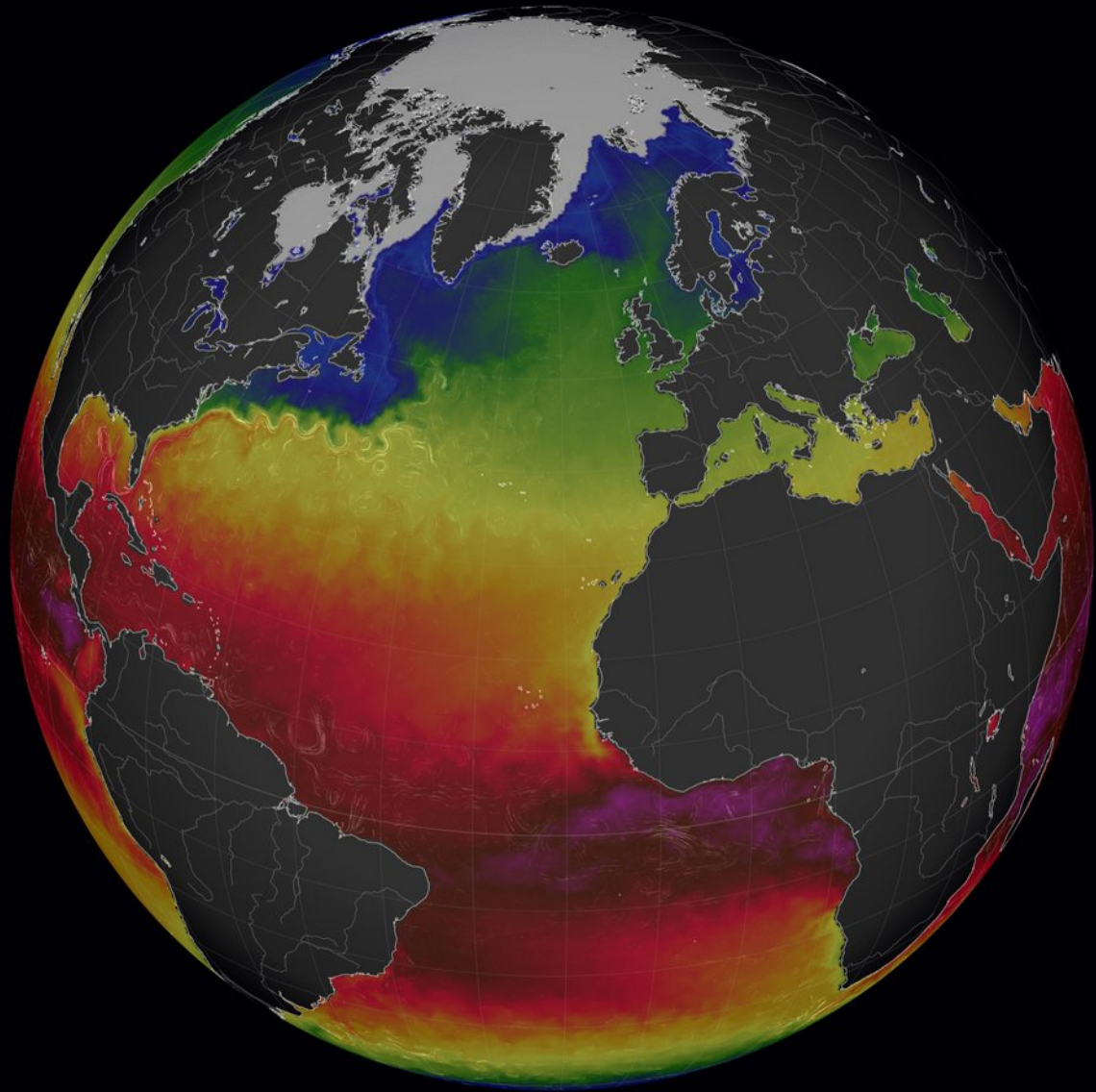


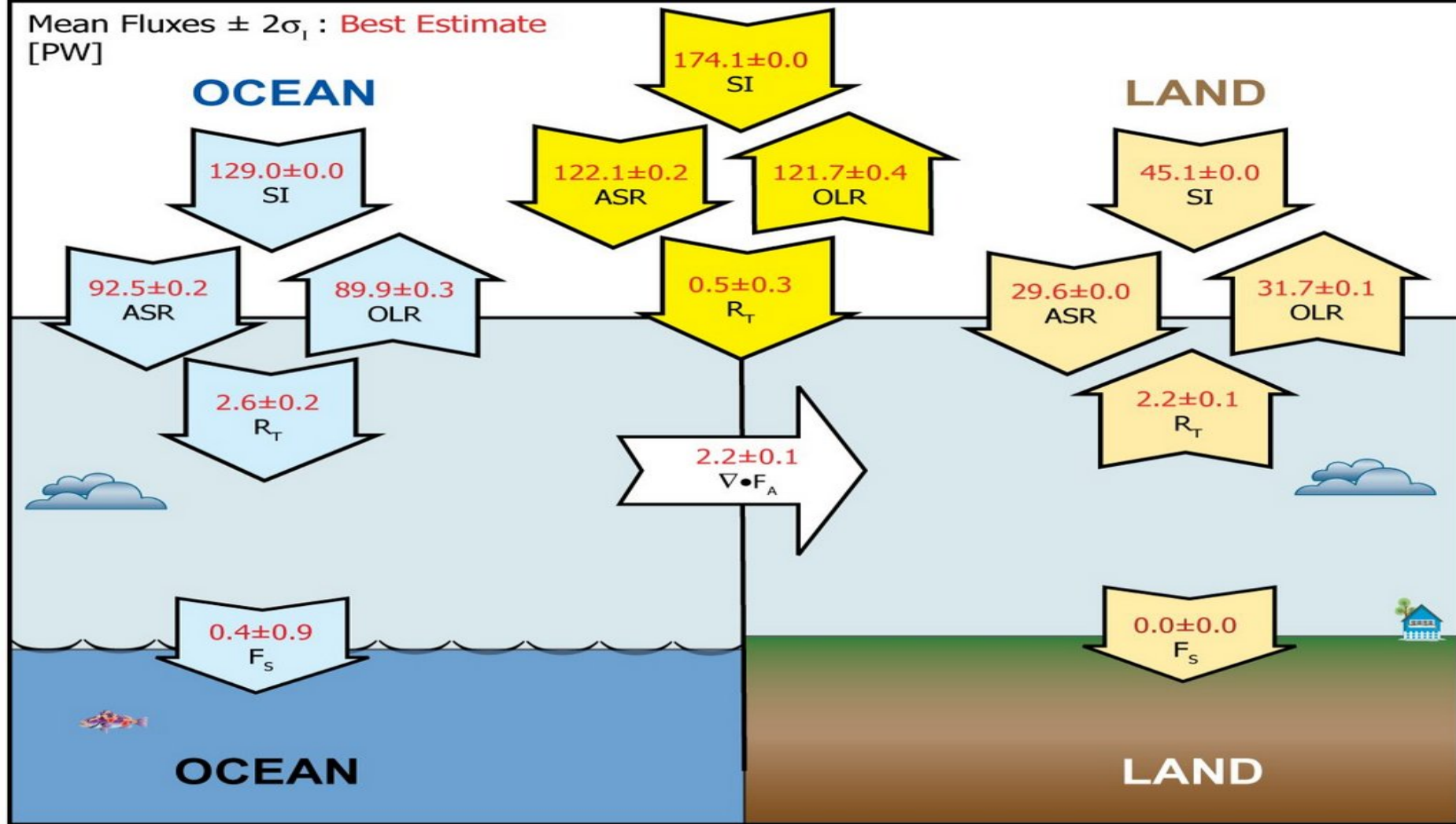
Powstawanie
solanki podczas
zamarzania wody
morskiej

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.

GFS Precipitable Water (kg m⁻²), 2m T 0°C (white)

1-day Avg | Tue, Apr 02, 2024

ClimateReanalyzer.org

Climate Change Institute | University of Maine

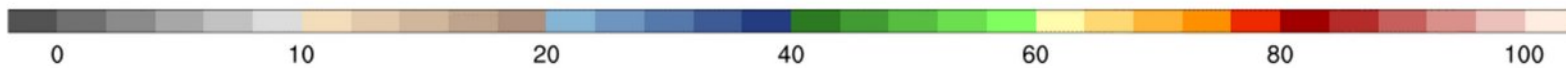
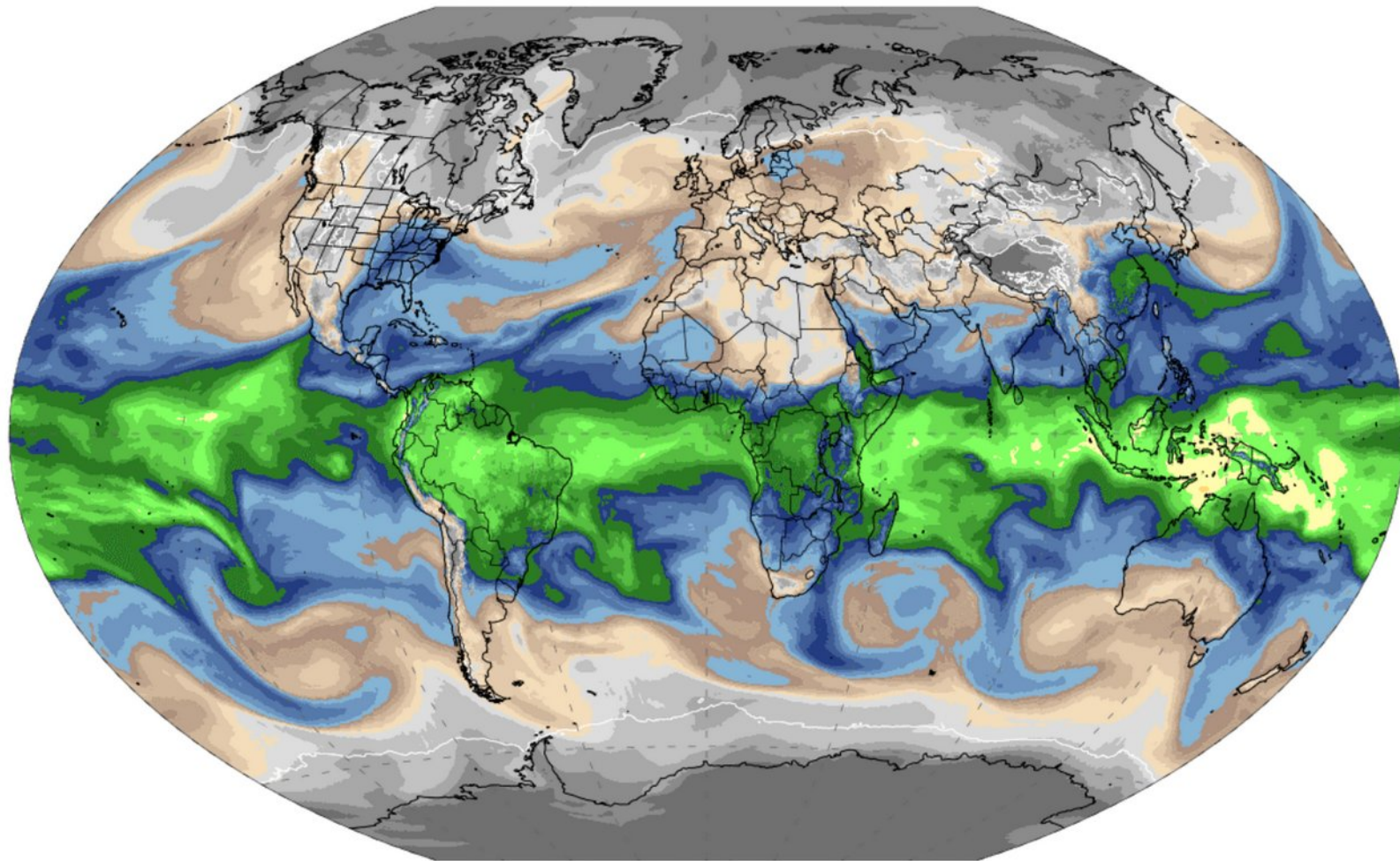
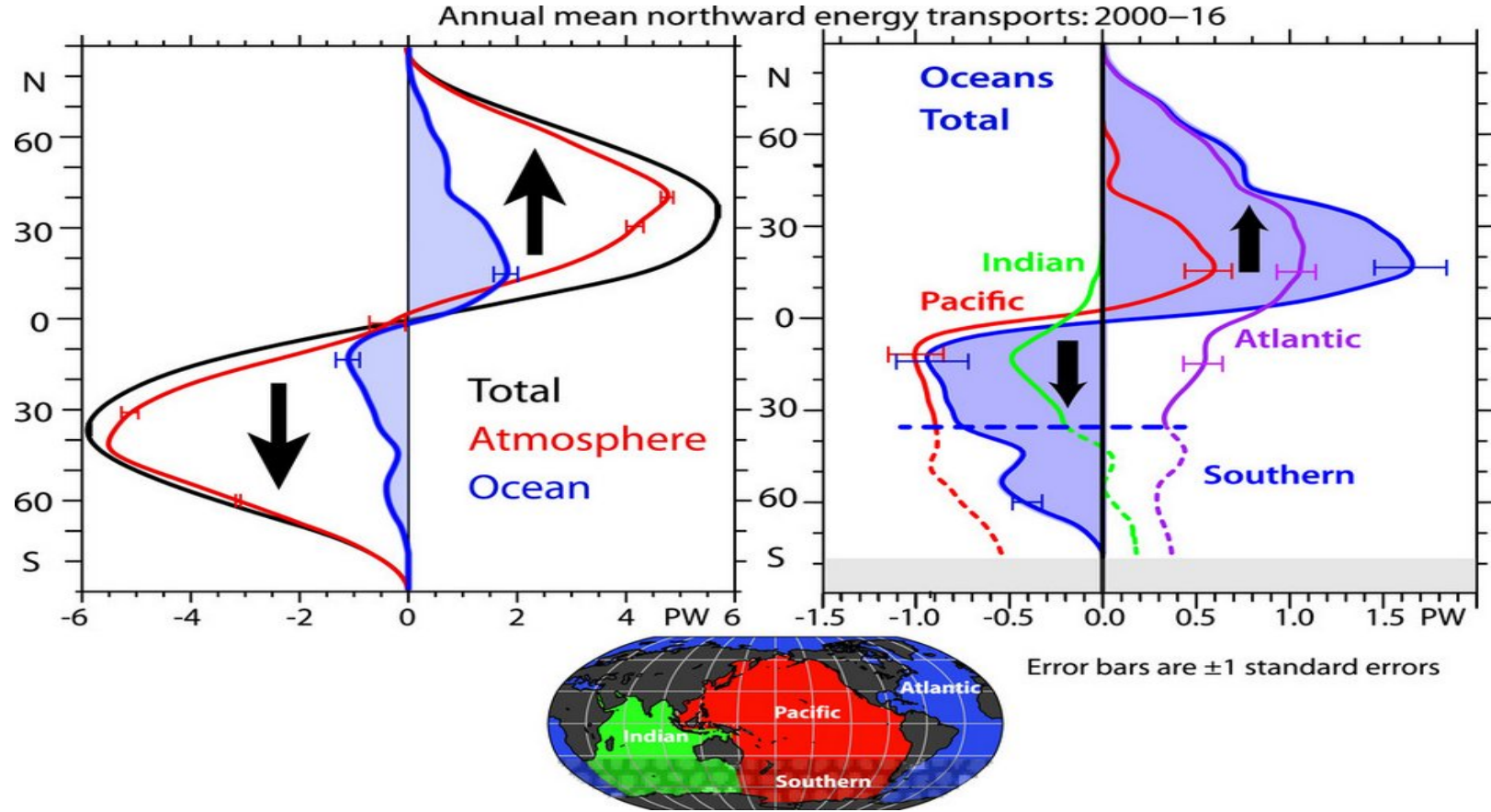


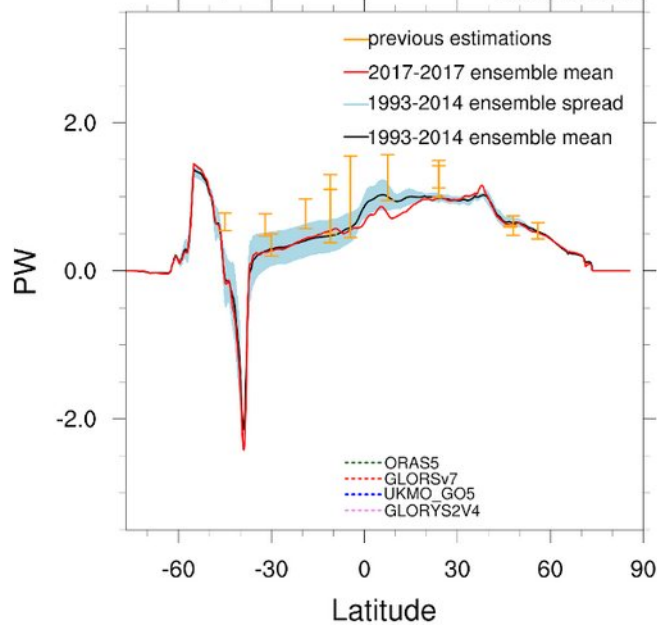
Fig. 3.



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 1σ . The ITF transport is not included here.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0872.1>

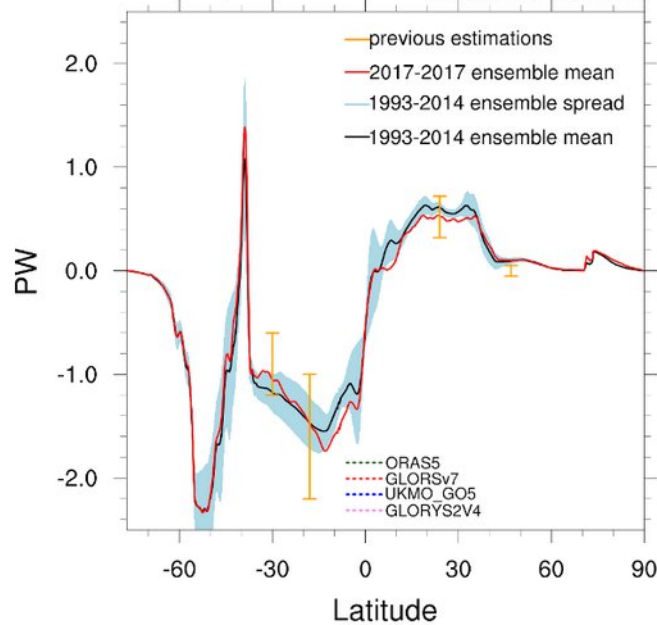
GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Atlantic



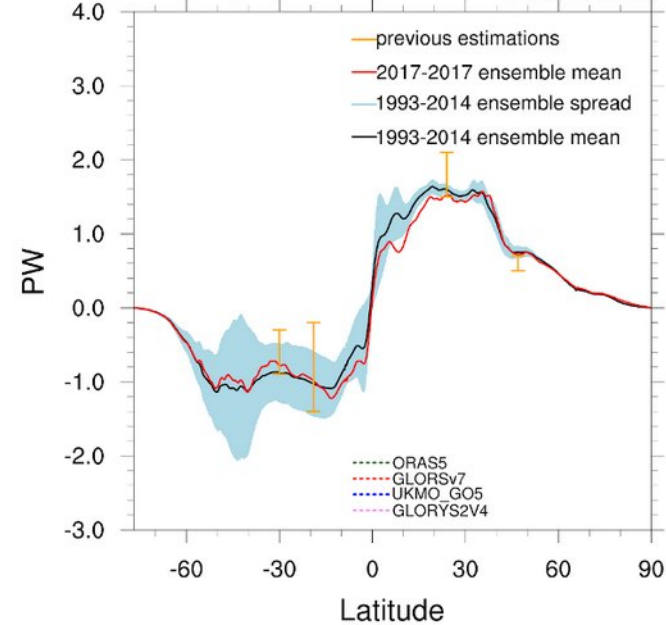
GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Pacific+Indian



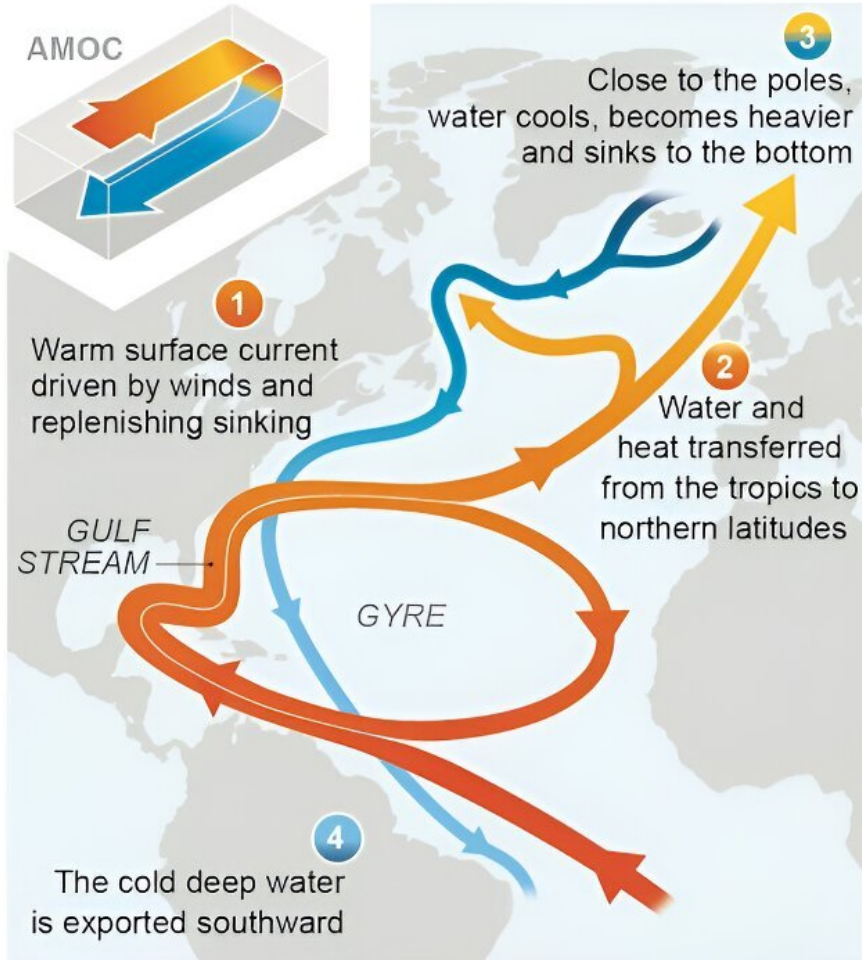
GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Global



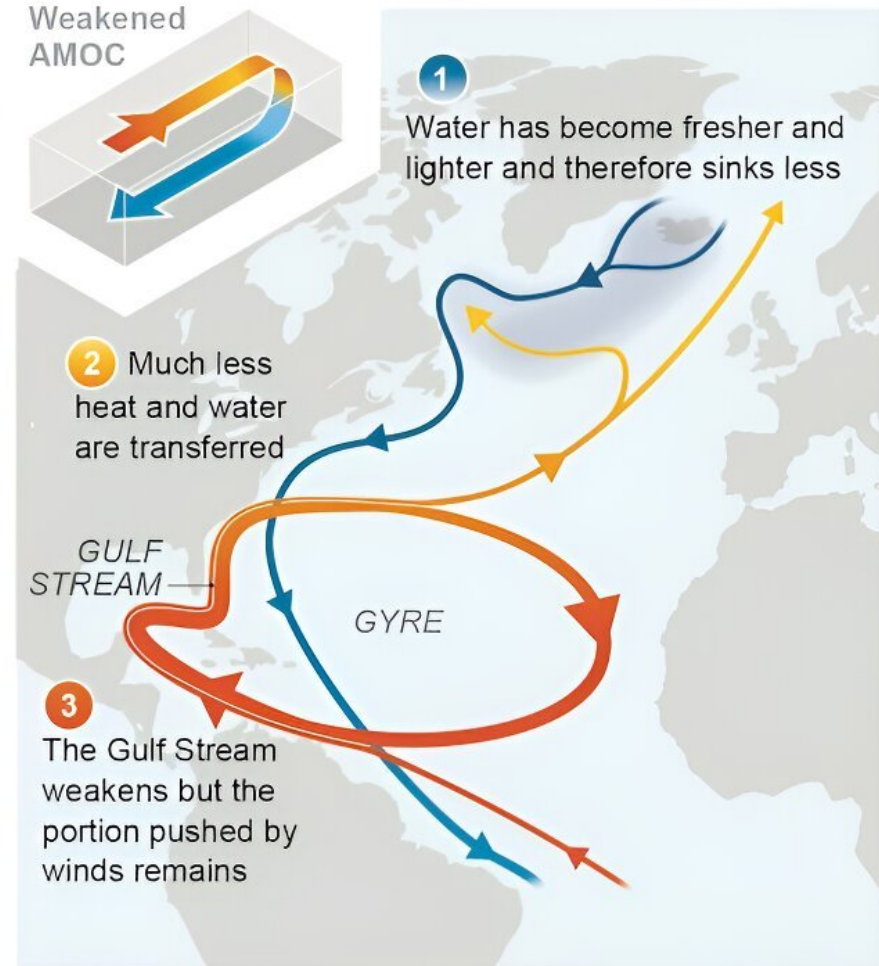
Today

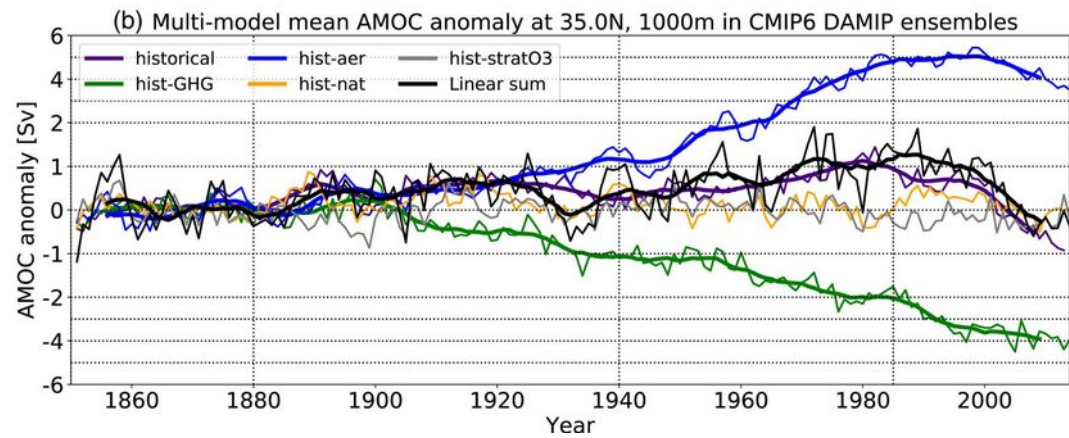
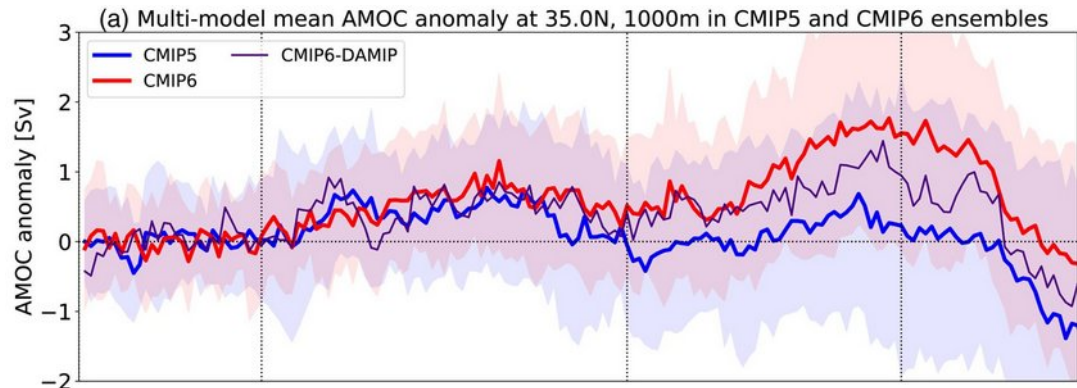
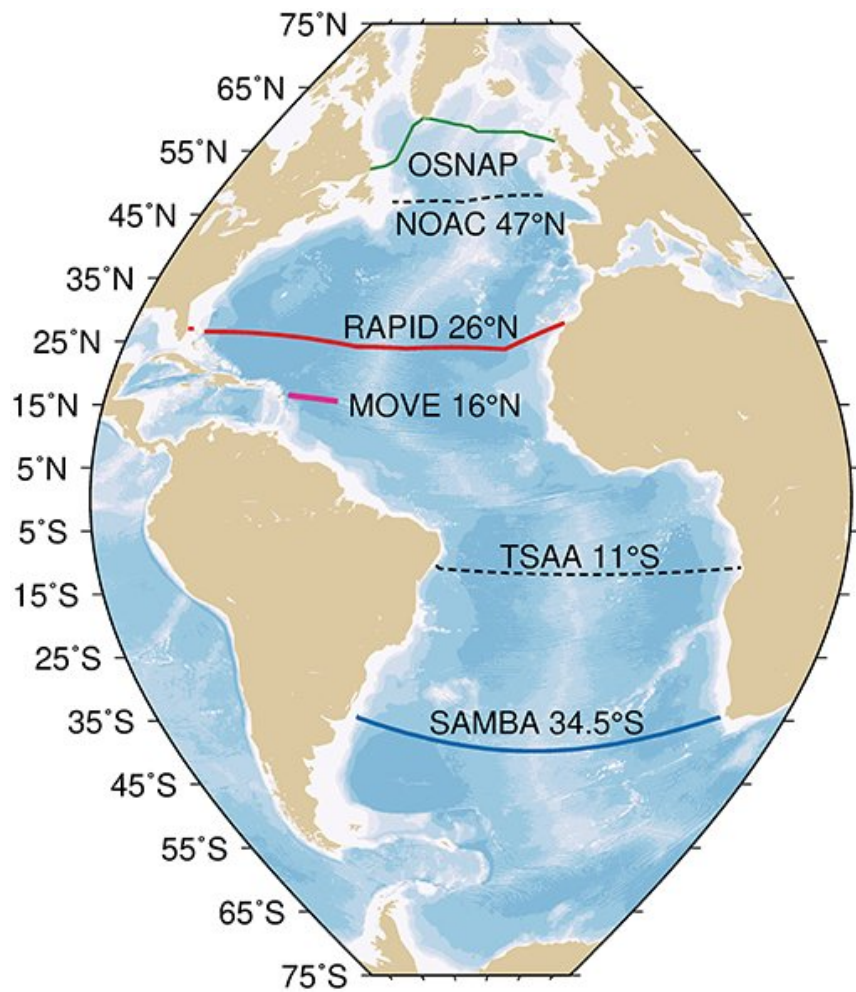
The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



In a warmer world

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



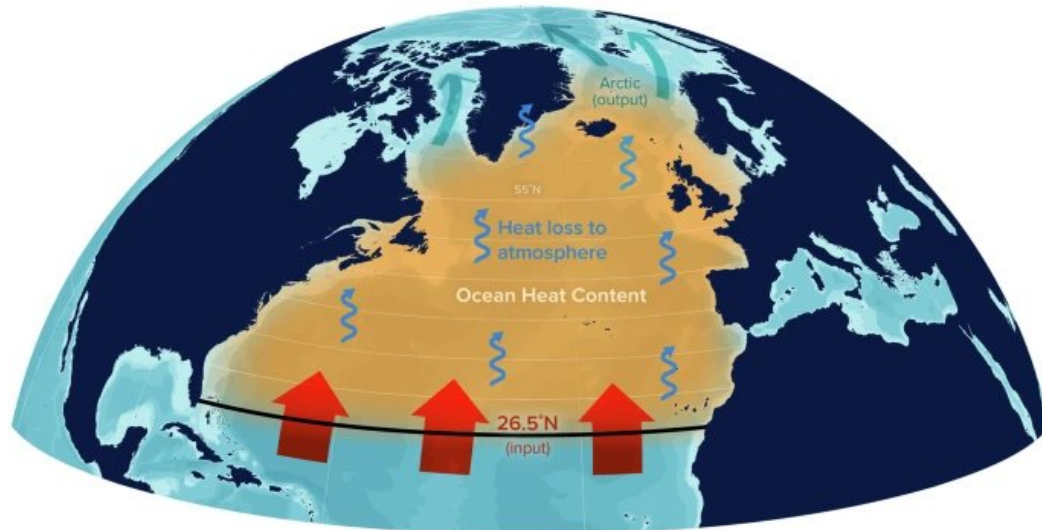
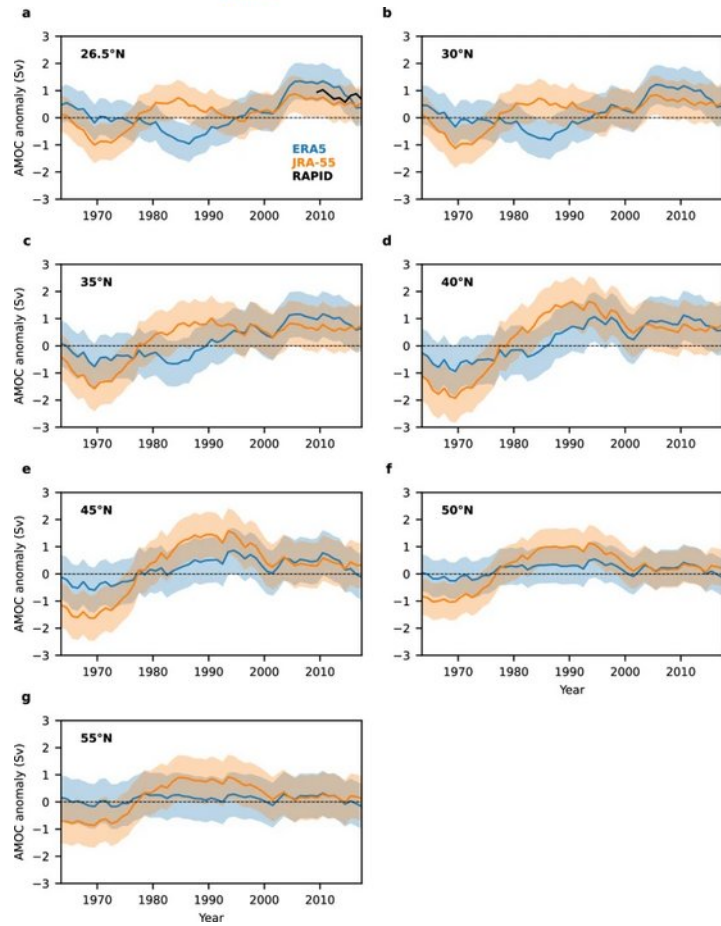


Atlantic overturning inferred from air-sea heat fluxes indicates no decline since the 1960s

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.