

Fizyka Procesów Klimatycznych

Wykład 4

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

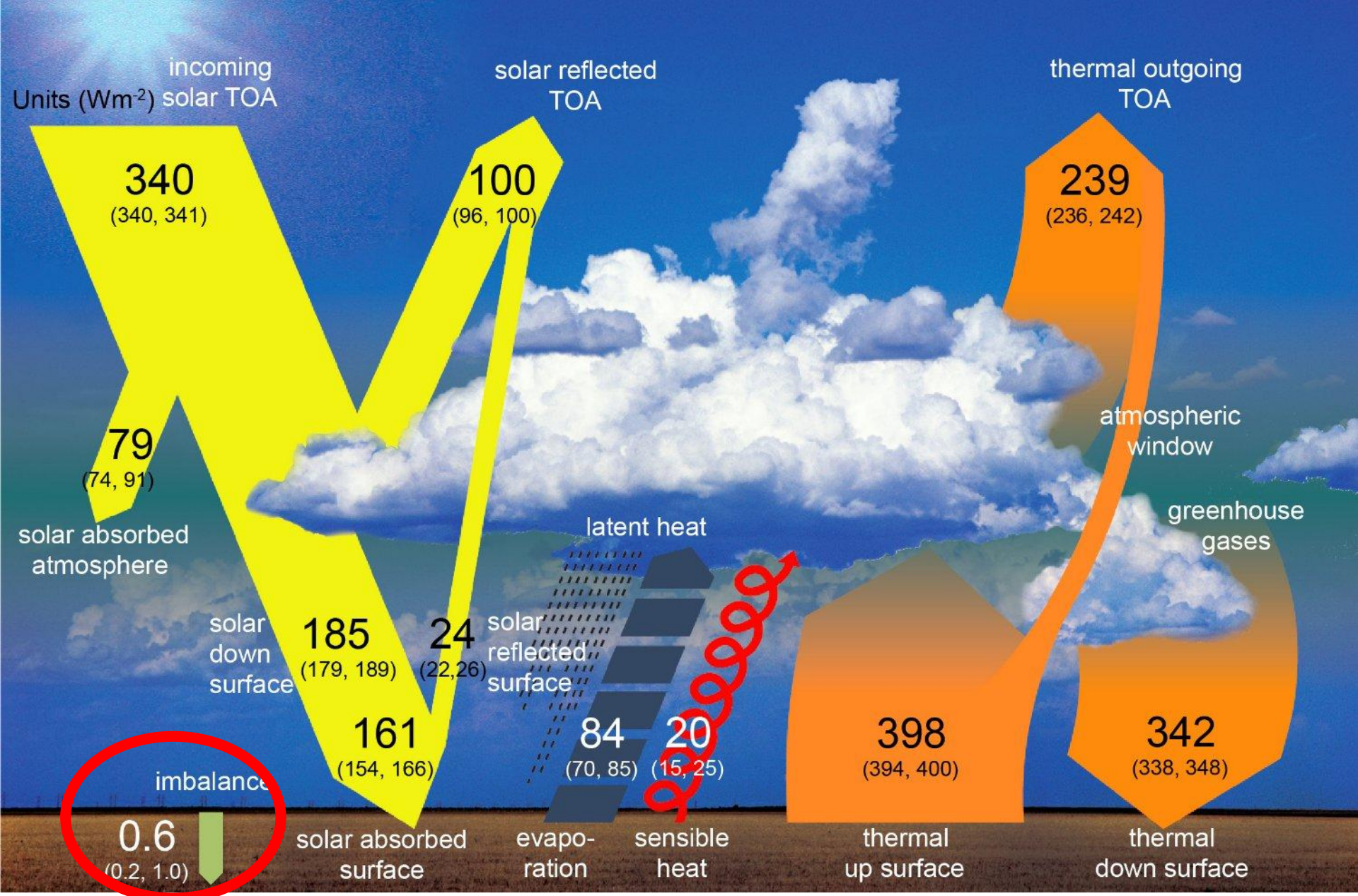
Wykorzystano slajdy dr Aleksandry Kardaś

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 ≈ 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/ar5/wg1/>

Gdzie Ziemia lokuje nadwyżkę energii

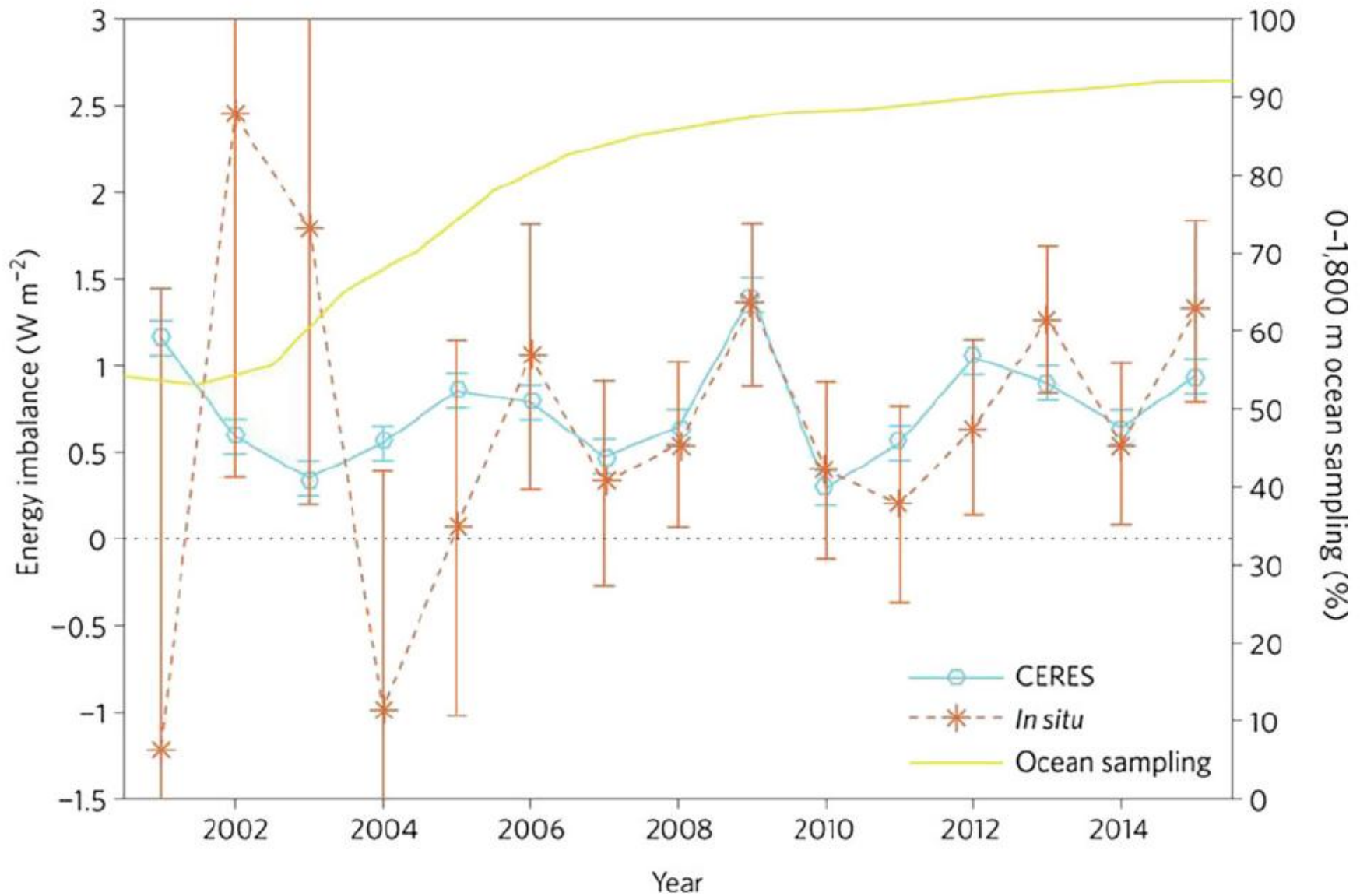
1%

3%

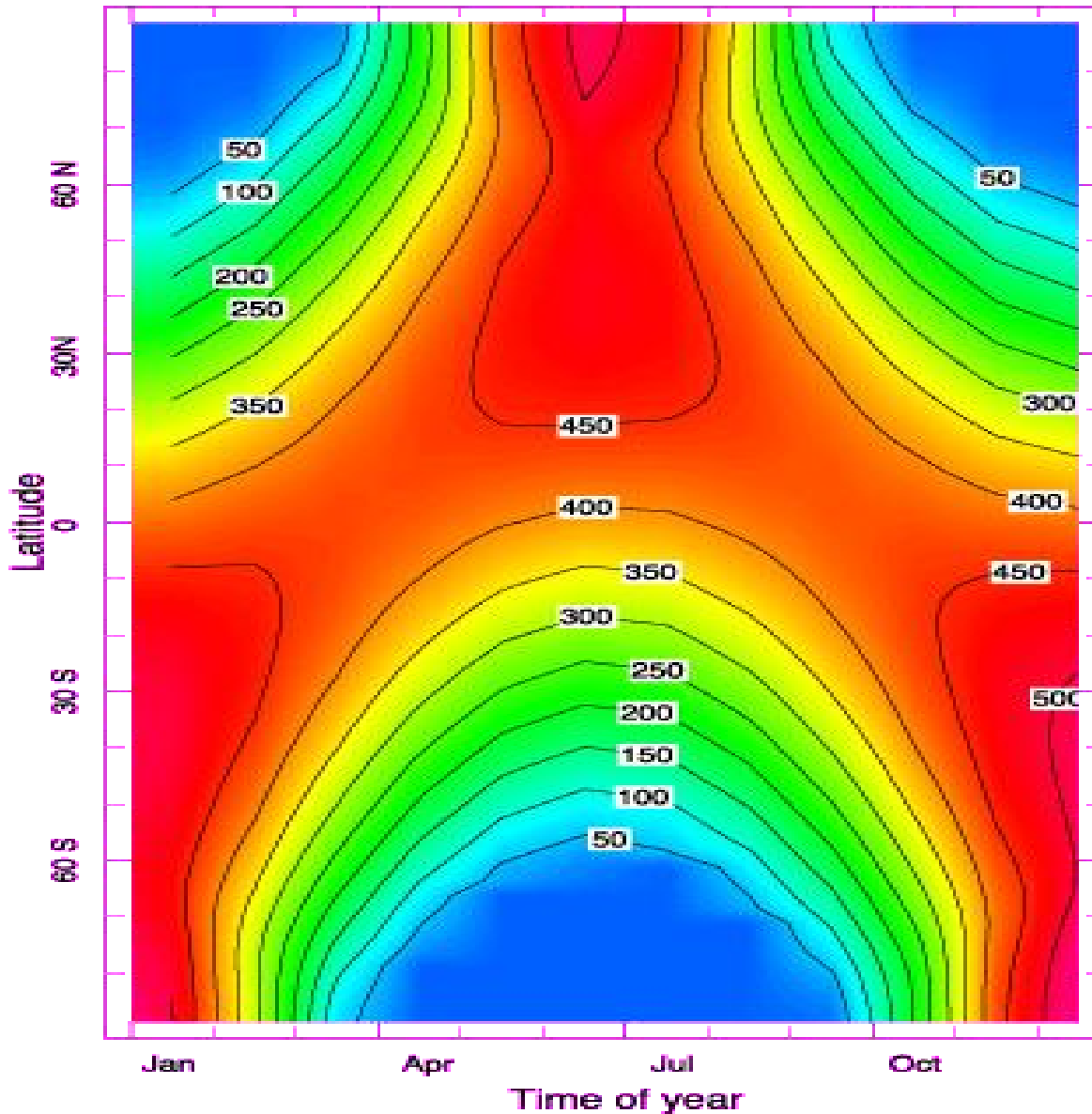
3%

93%

Dokąd trafia nadwyżka energii z nierównowagi radiacyjnej: nagrzewanie oceanów 93%, topnienie lodu (pływający lód morski, lodowce, lądolody) 3%, ogrzewanie lądów 3%, nagrzewanie się atmosfery 1%.



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:

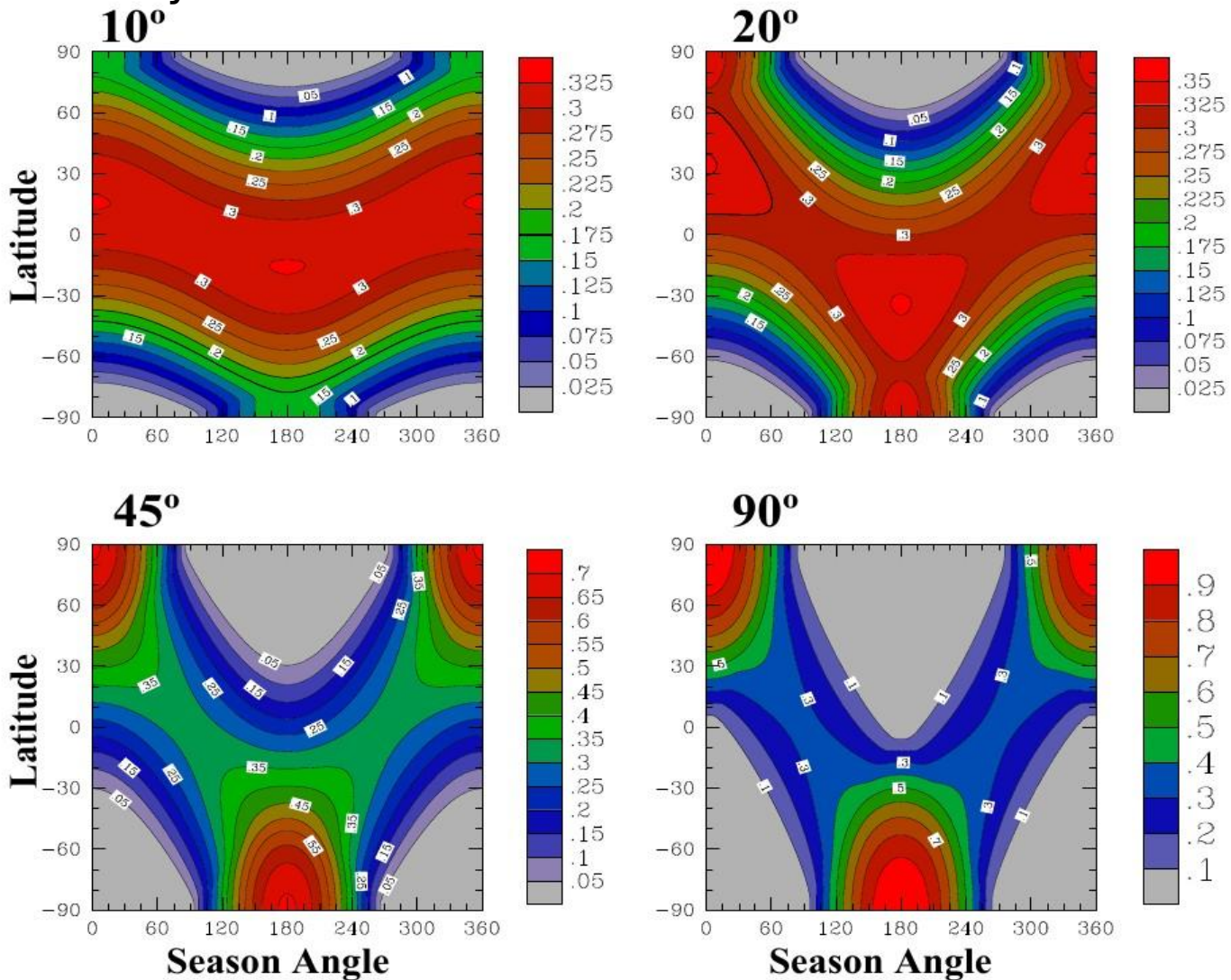


Fig. 7.5: The seasonal and latitudinal distribution of daily-mean flux factor for four different values of the obliquity. In these plots, a circular orbit has been assumed. To obtain the daily mean energy flux incident on each square meter of the planet's surface, one multiplies the flux factor by the 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° (Pierrehumbert 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

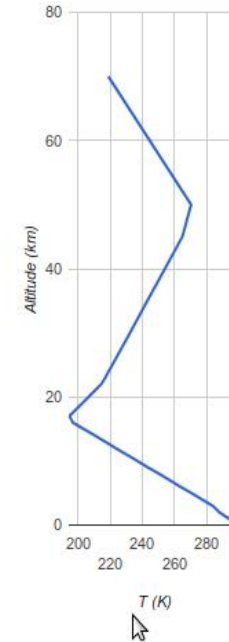
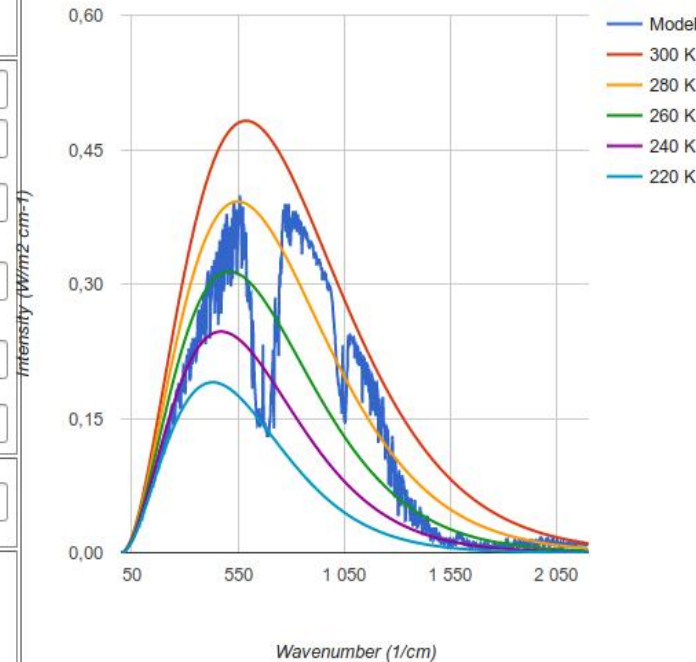
Locality

Altitude (km)

Model Output

Upward IR Heat Flux **298.52 W/m²**

Ground Temperature **299.7 K**



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

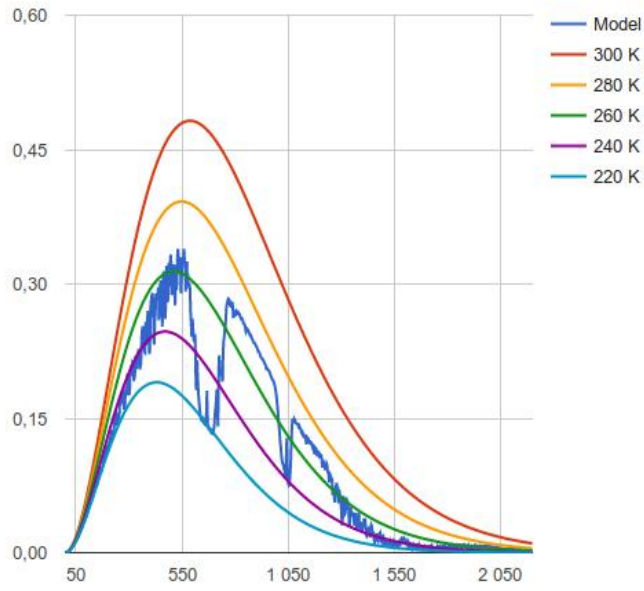
Altitude (km)

Model Output

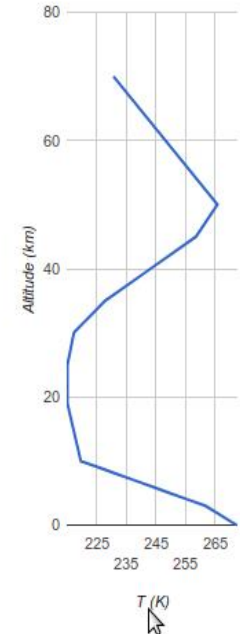
Upward IR Heat Flux **235.217** W/m²

Ground Temperature **272.2** K

Intensity (W/m² cm⁻¹)



Wavenumber (1/cm)



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

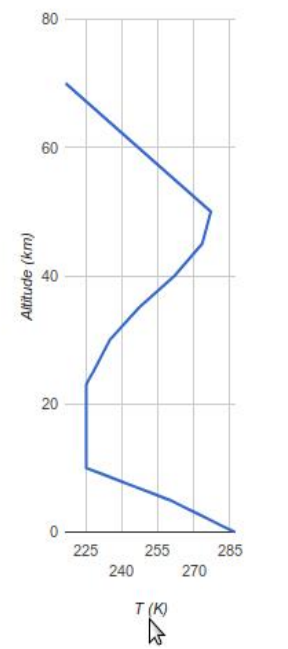
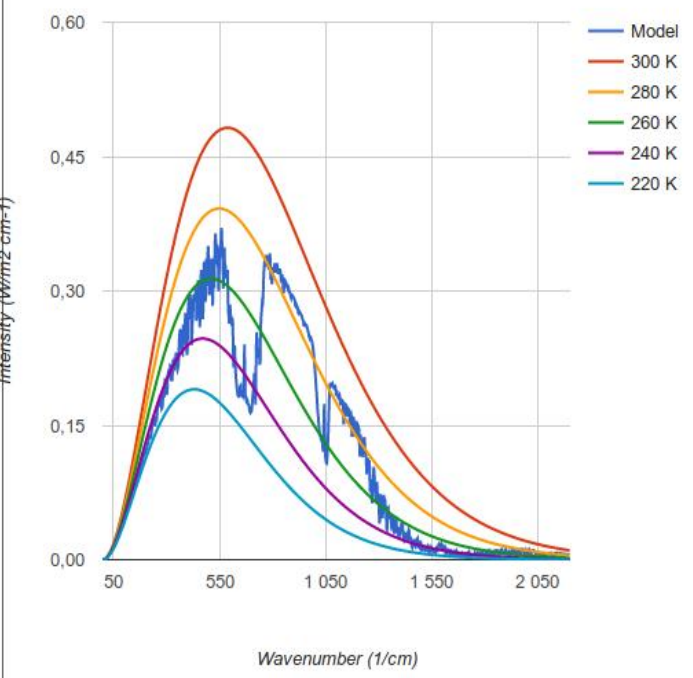
Locality

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)

Looking down

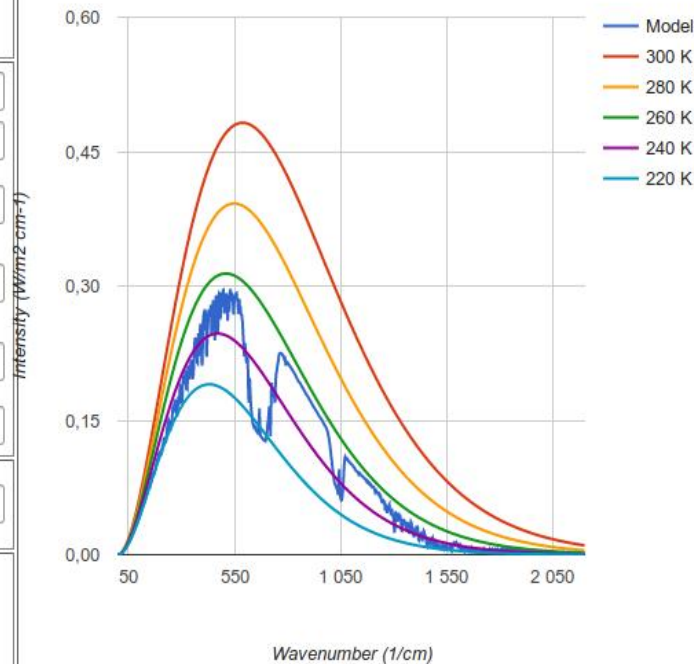
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

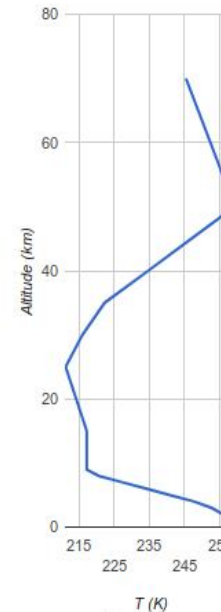
Model Output

Upward IR Heat Flux **202.059** W/m²

Ground Temperature **257.2** K



Wavenumber



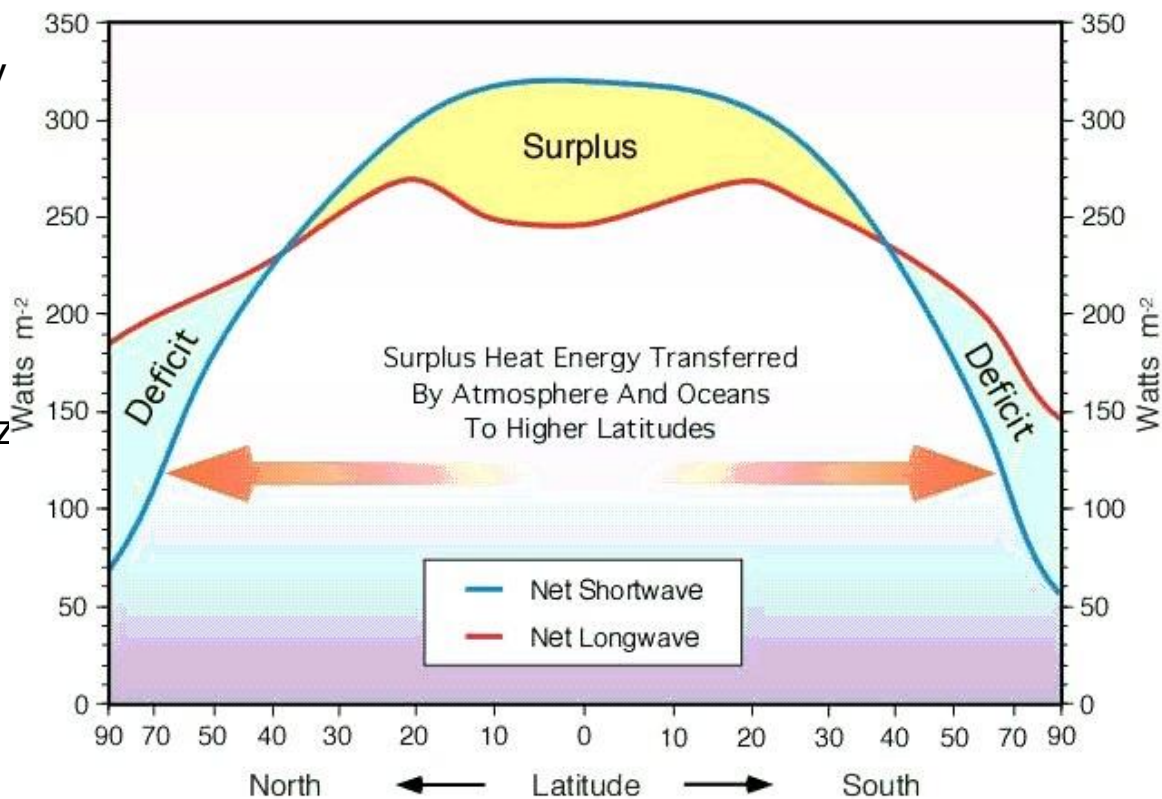
T (K)

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

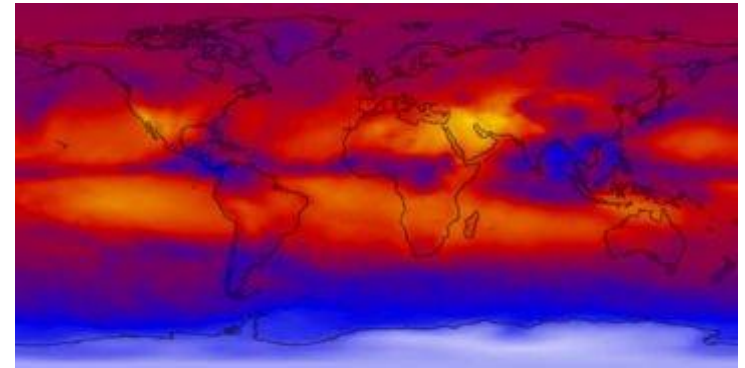
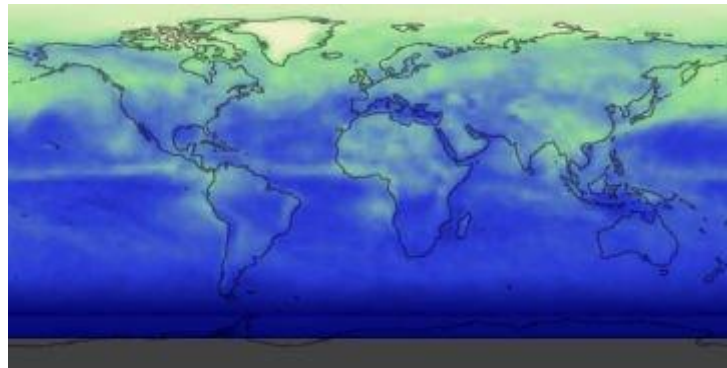
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

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).

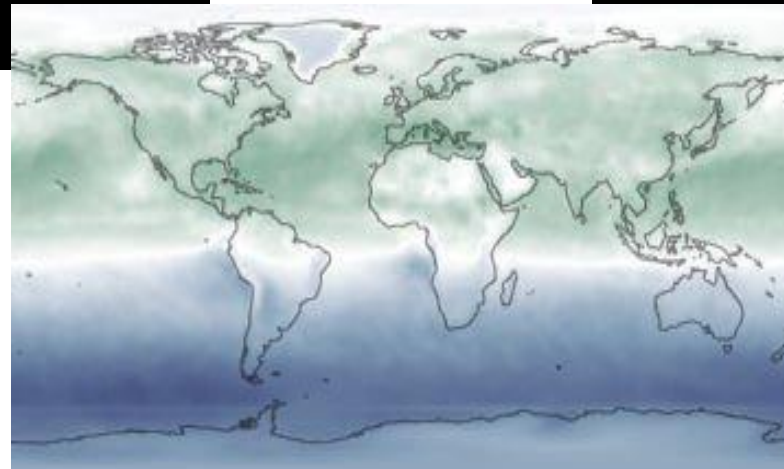
Mechanizmy transferu energii za pośrednictwem promieniowania wraz procesami redystrybucji energii kształtują pogodę i klimat (wieloletnie statystyki pogody).



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](#))



Przykład:
LIPIEC 2005
- zima na
półkuli
południowej.



Problem rozkładu łądów:

Zonal Mean Surface Temperature, 1970-2000

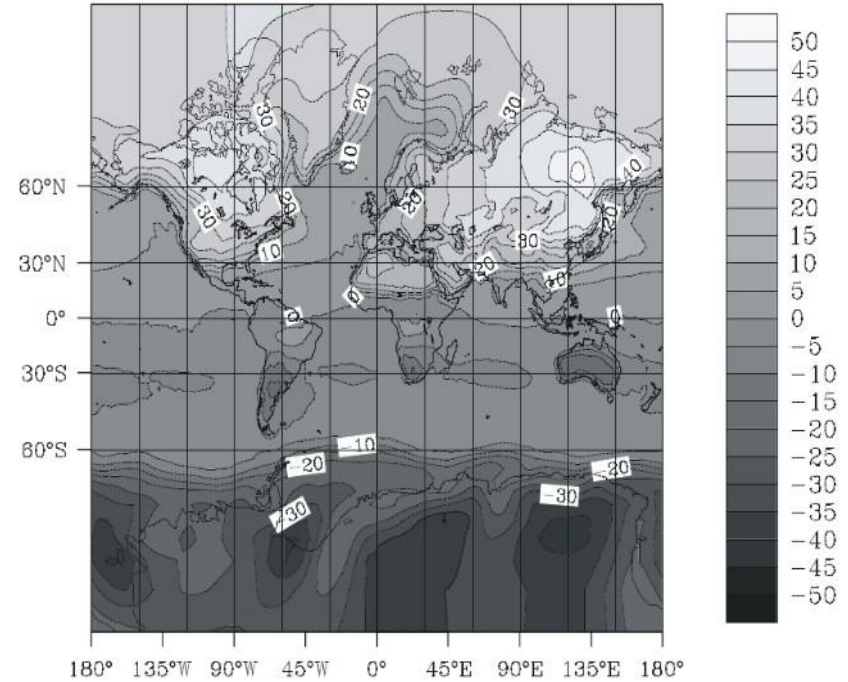
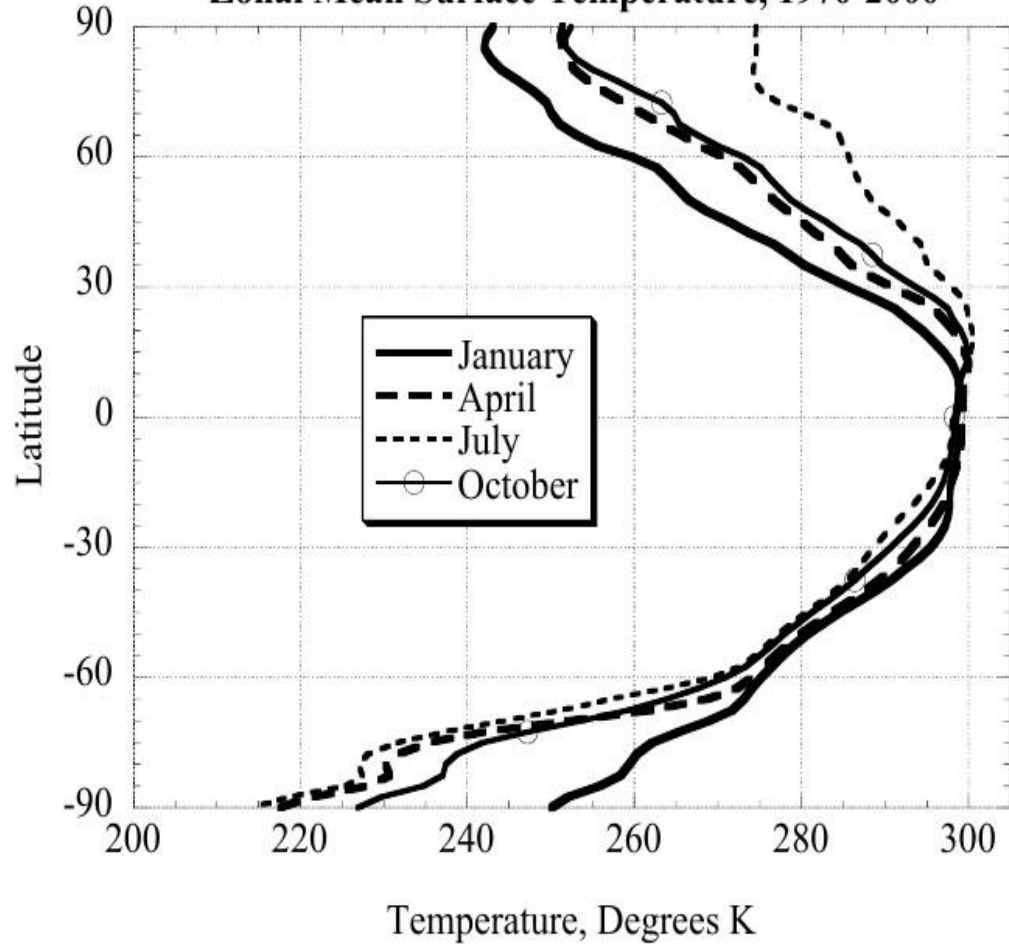


Figure 7.2: Map of July-January surface air temperature difference.

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 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.

Bardziej precyzyjne spojrzenie:

Trenberth, 2003: modern approach to the energetics of global circulation

$$\mathbf{TE = PE + IE + LE + KE}$$

total energy = potential + internal + latent + kinetic

Now the first two terms can be combined into the Total Potential Energy (TPE) which, through a major insight from Lorenz, can in turn be partitioned:

$$\mathbf{TPE = UPE + APE}$$

Where APE is the **Available Potential Energy** and UPE is the Unavailable Potential Energy.

Lorenz points out how friction is positive definite in terms of heating and thus must contribute to UPE.

Note these do NOT relate simply to Dry Static Energy.

In terms of transports we partition

Total Energy transports

into

Dry Static Energy (**DSE**),

Latent Energy (**LE**),

and

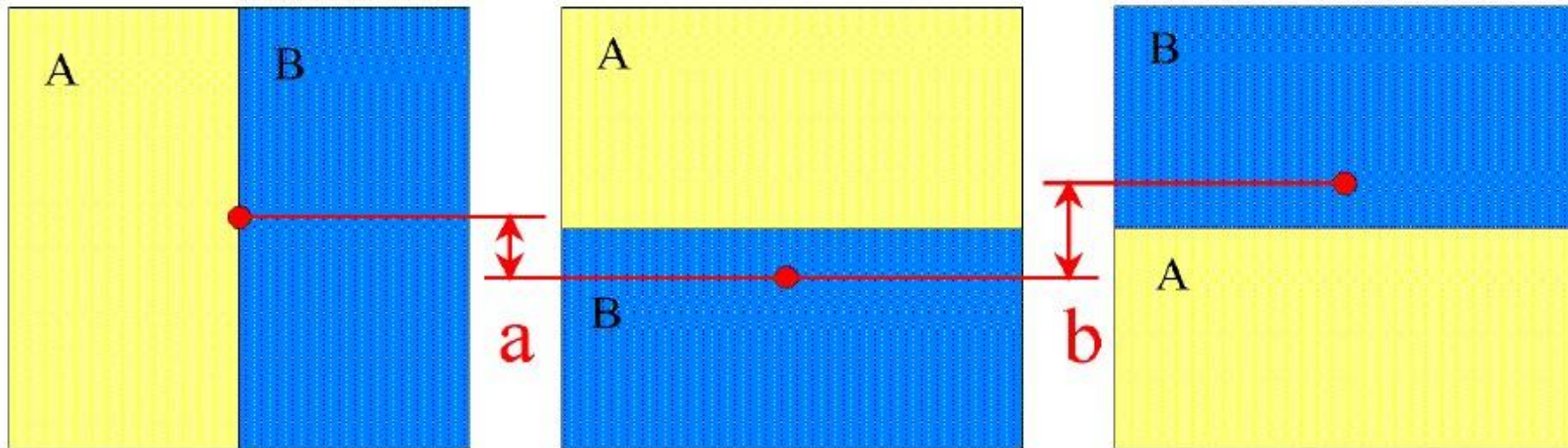
Kinetic Energy (**KE**), but the latter is small.

Transport of energy also involves work done:

Dry static energy **DSE = SH + PE** sensible heat+geopotential

Moist static energy **MSE = DSE + LE** DSE+latent

Total energy **TE = MSE + KE** kinetic energy (small)



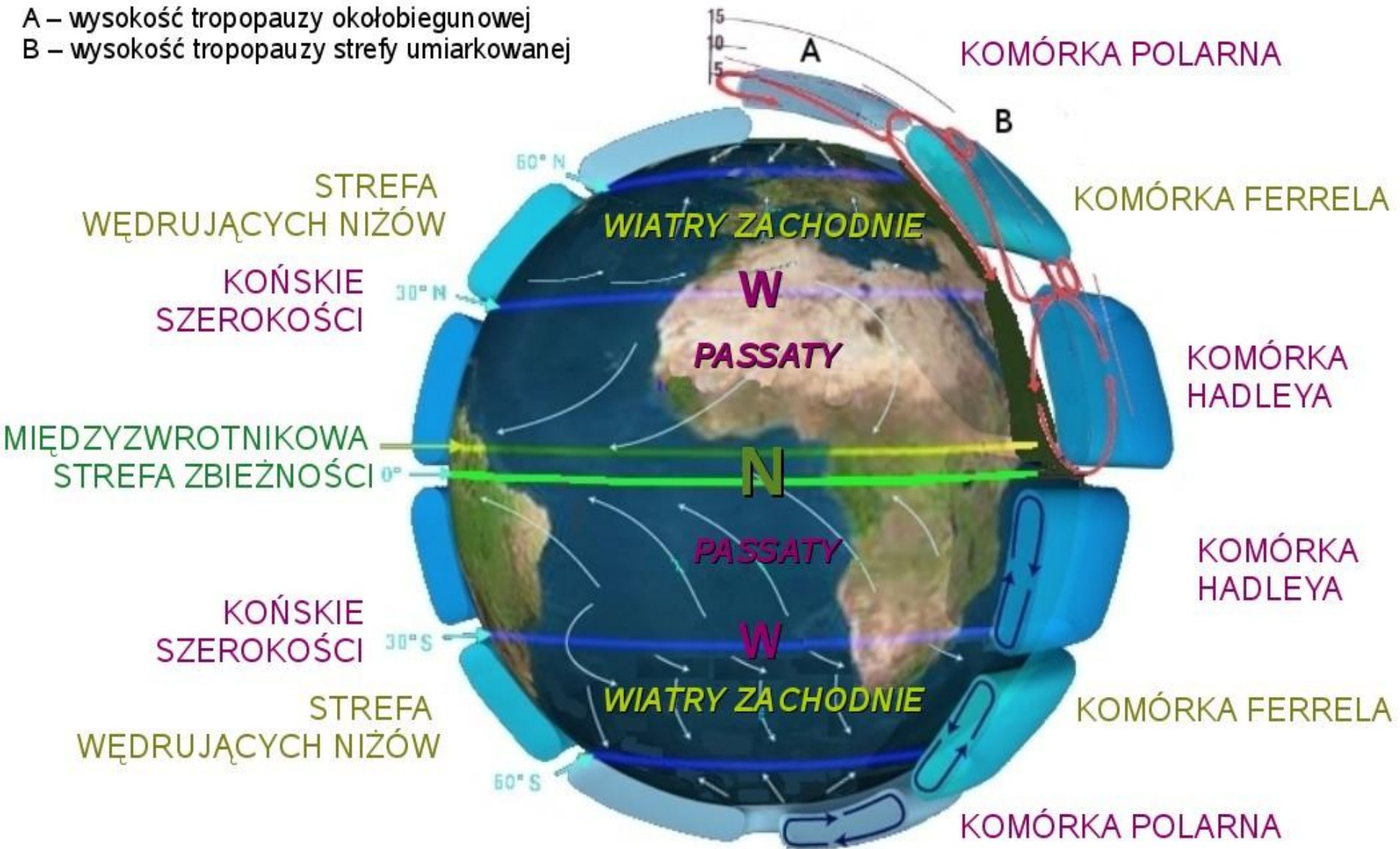
Uproszczony schemat energetyczny niżu atmosferycznego średnich szerokości geograficznych (a- po lewej) i cyklonu tropikalnego (b - po prawej).

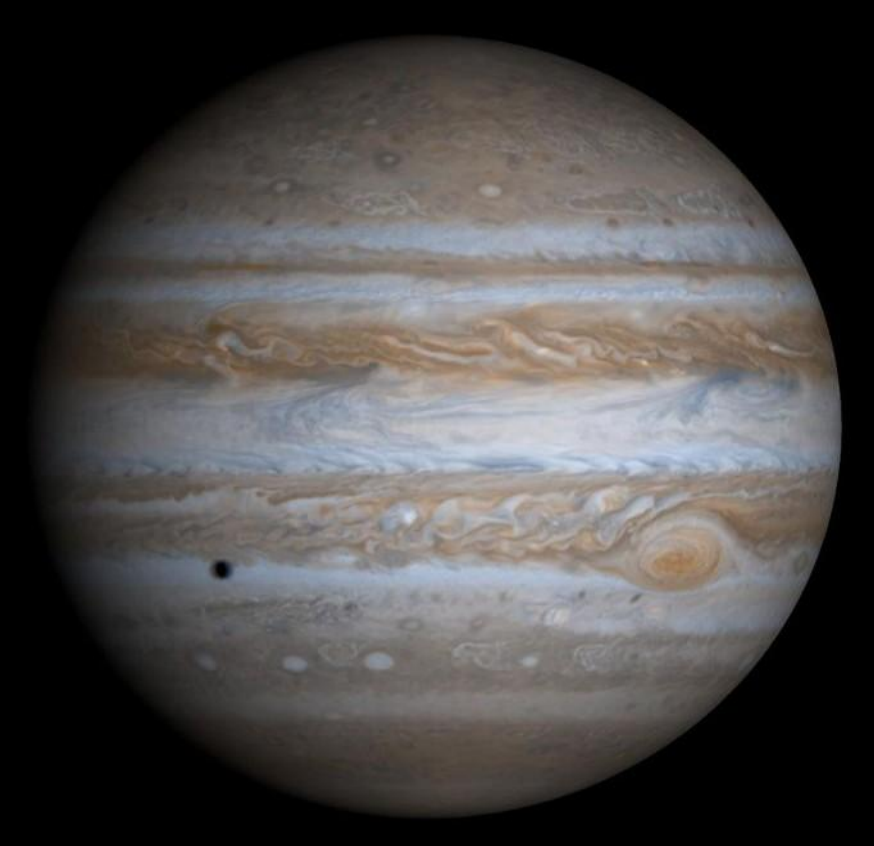
W środku przedstawiono sytuację końcową, w obu wypadkach taką samą.

Energia kinetyczna KE układu uzyskiwana jest z energii potencjalnej przez obniżenie środka ciężkości (kosztem energii potencjalnej PE)

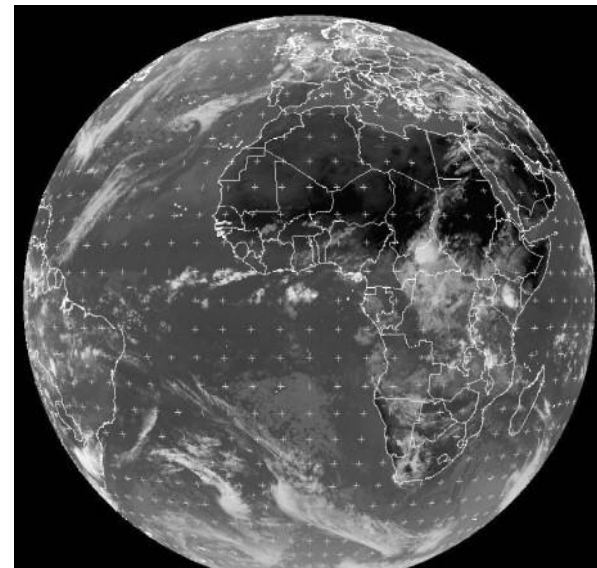
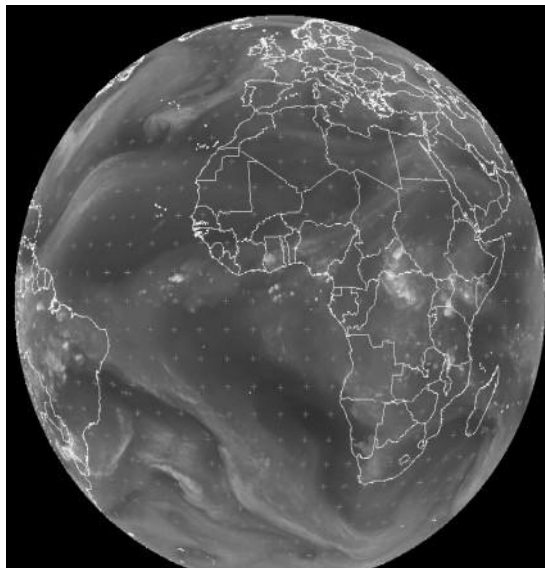
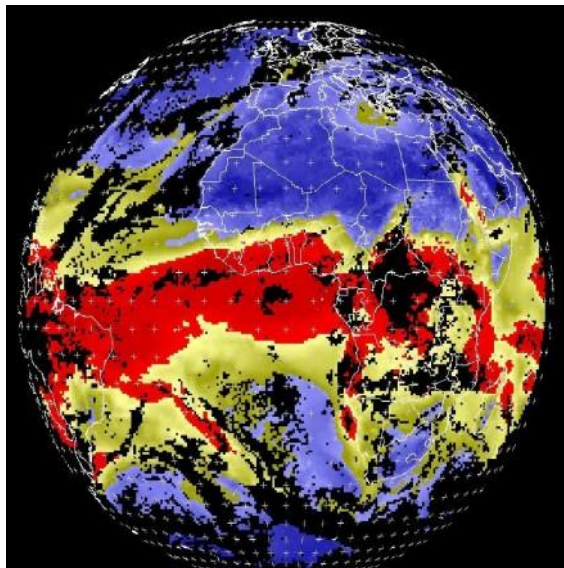
Oznaczenia: A - cieplejsza (mniej gęsta) masa powietrza,
 B - chłodniejsza (bardziej gęsta) masa powietrza,
 czerwona kropka - środek ciężkości, strzałki pokazują jak obniży się środek ciężkości układu przy przejściu ze stanu początkowego do końcowego.

Ogólna cyrkulacja atmosfery odpowiada za transport ciepła i wilgoci w skal globu.

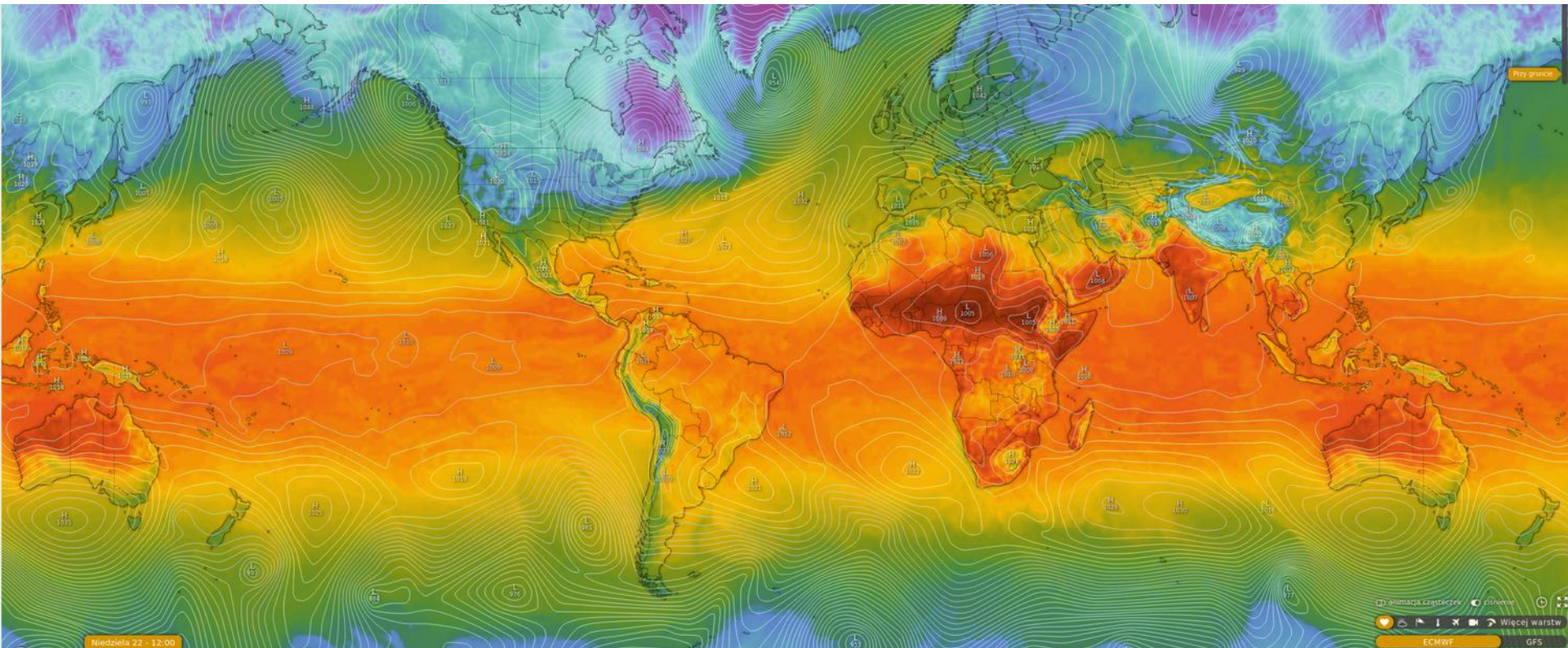




Atmosfery innych planet też mają komórki cyrkulacyjne, czasem lepiej widoczne niż w przypadku Ziemi.



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



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

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

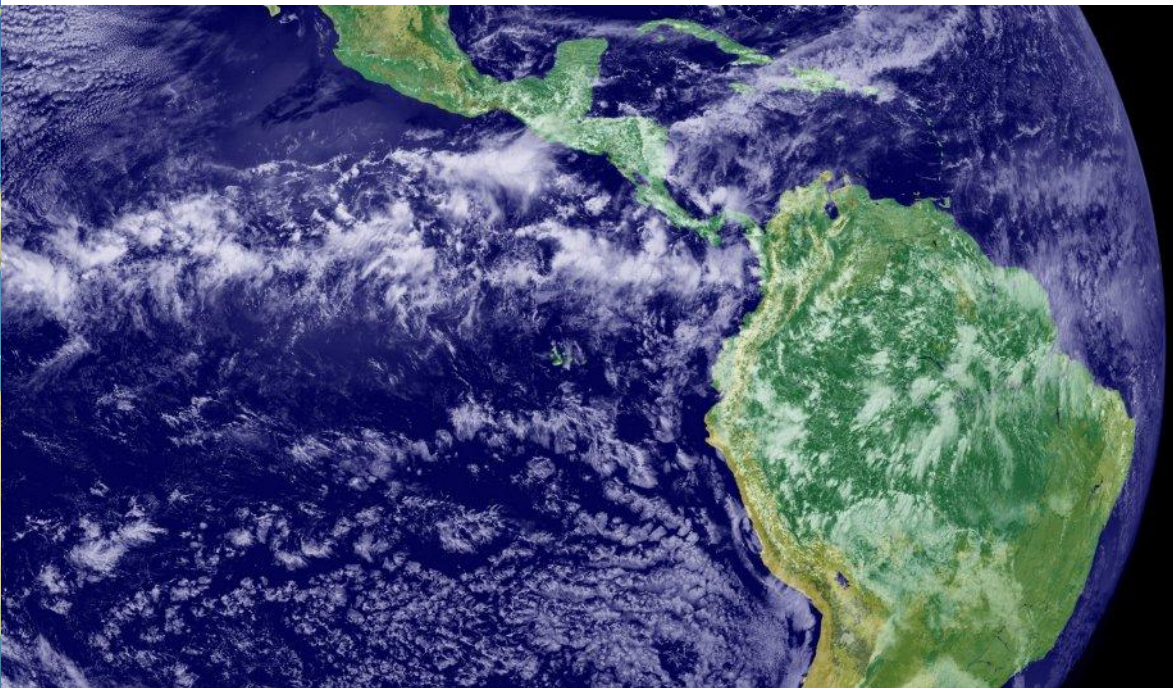
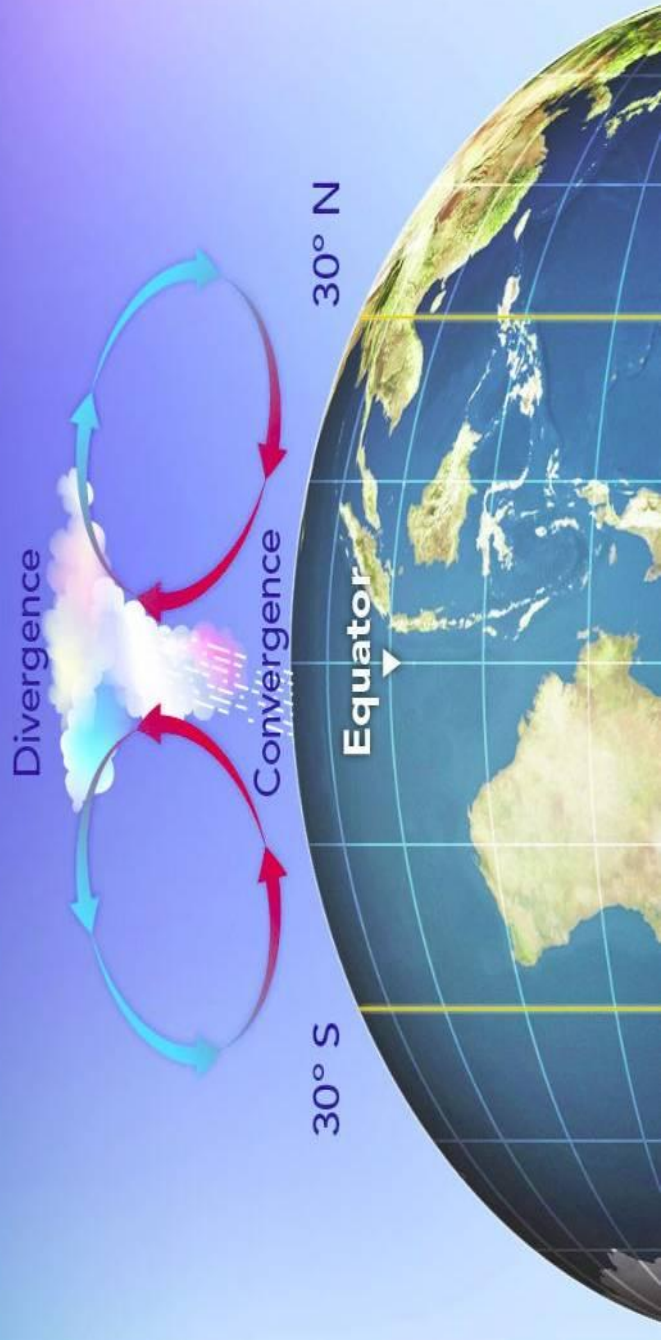
This is reason Hadley circulation varies with annual cycle.

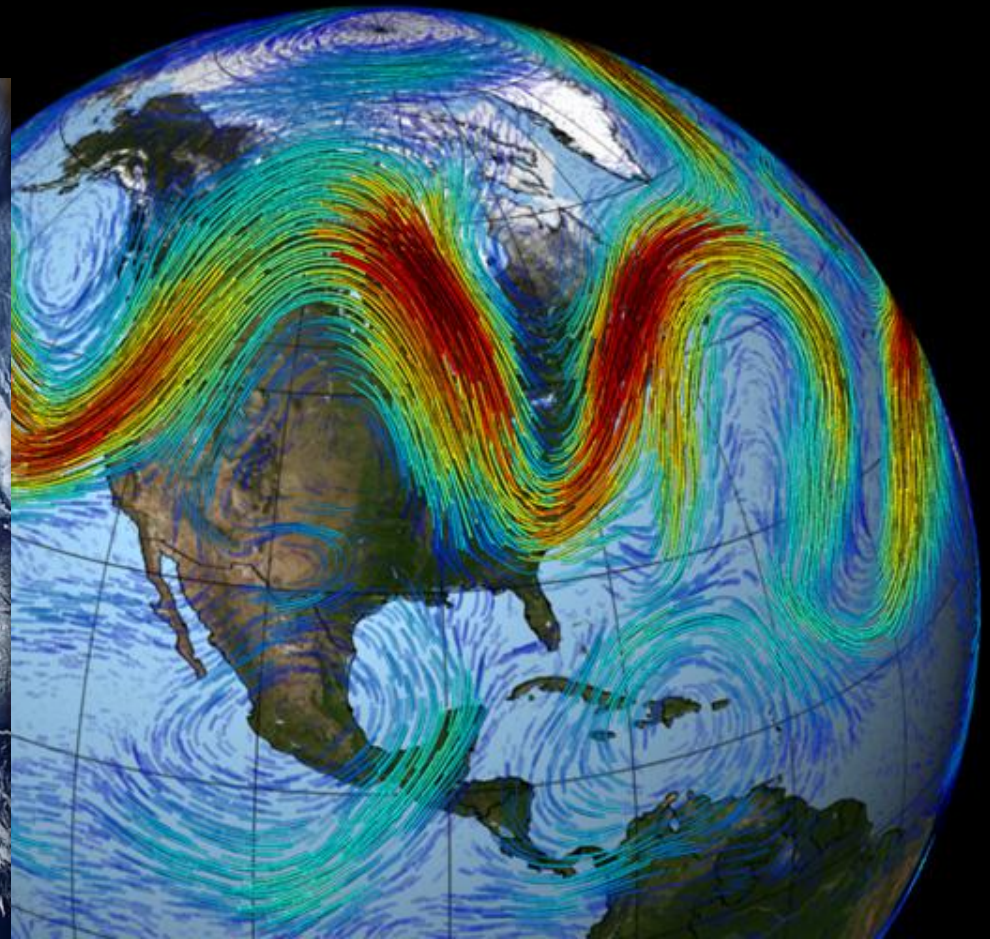
The cooling drives the downward branch of the Hadley circulation, clears the skies to allow OLR to contribute, and allows solar radiation through to surface where it provides moisture through evaporation.

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.

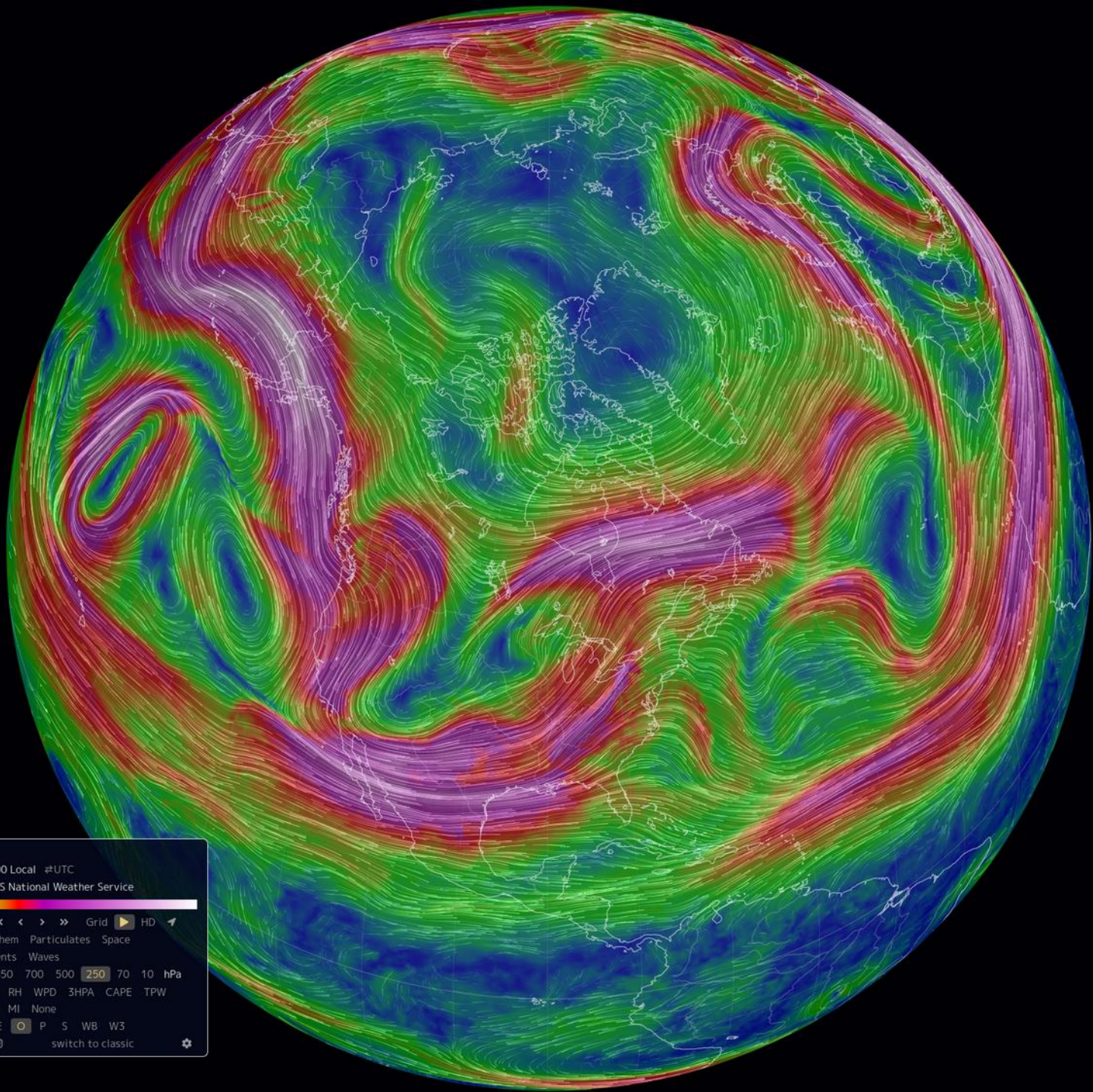
Komórka Hadleya i strefa zbieżności równikowej.





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

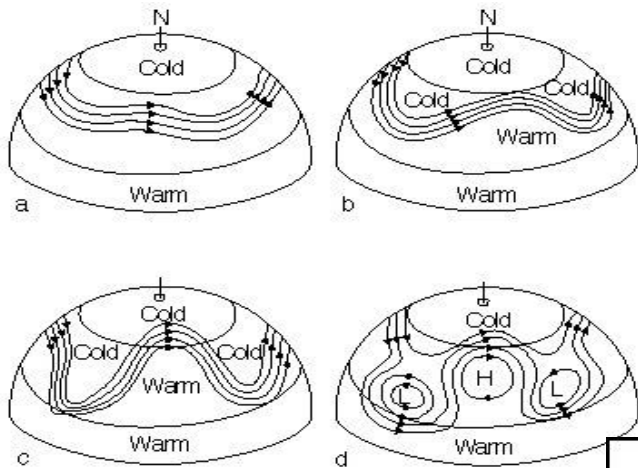
Mode | **Air** Ocean Chem Particulates Space

Animate | **Wind** Currents Waves

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

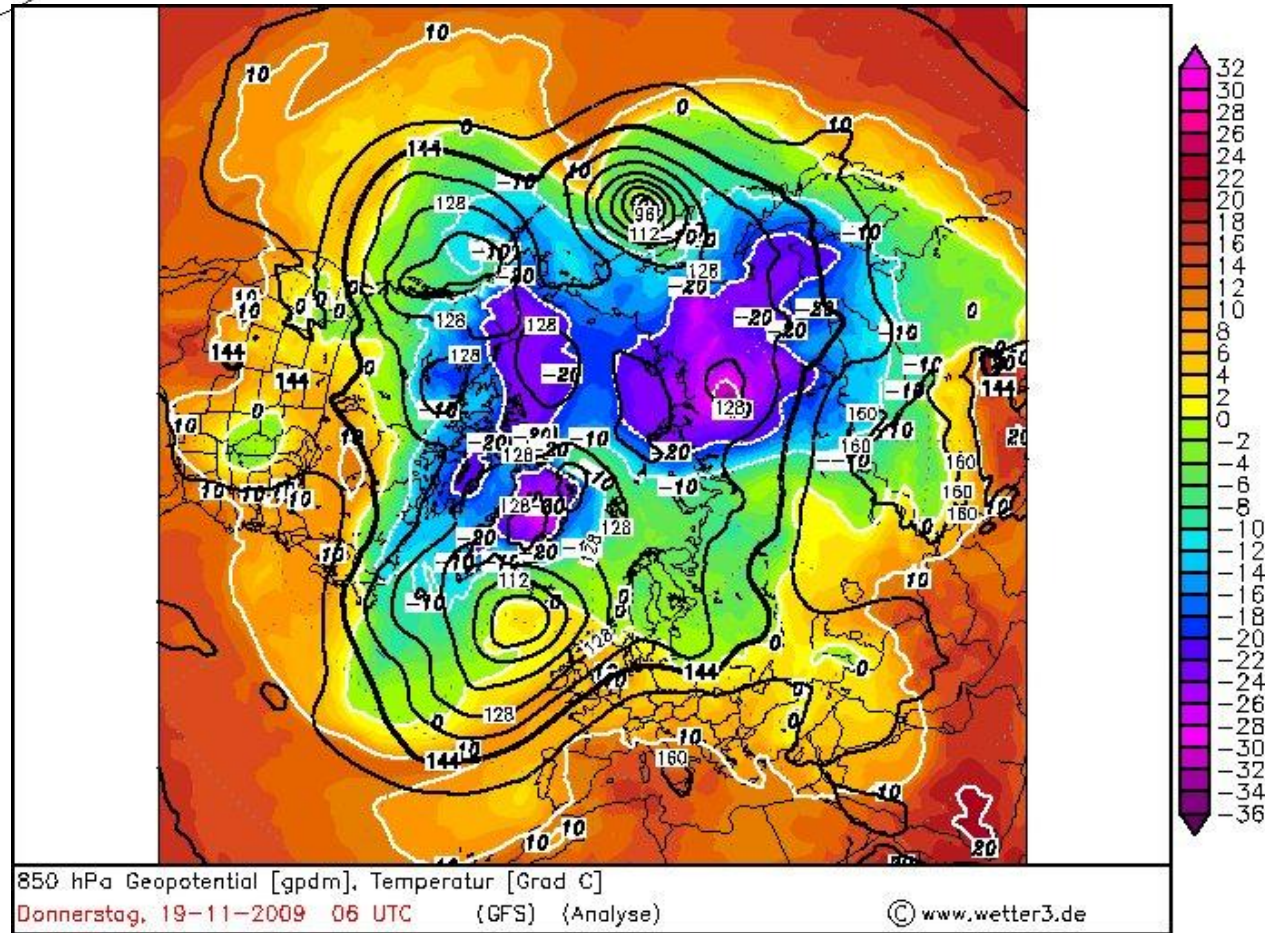
Overlay | **Wind** Temp RH WPD 3HPA CAPE TPW
TCW MSLP MI None

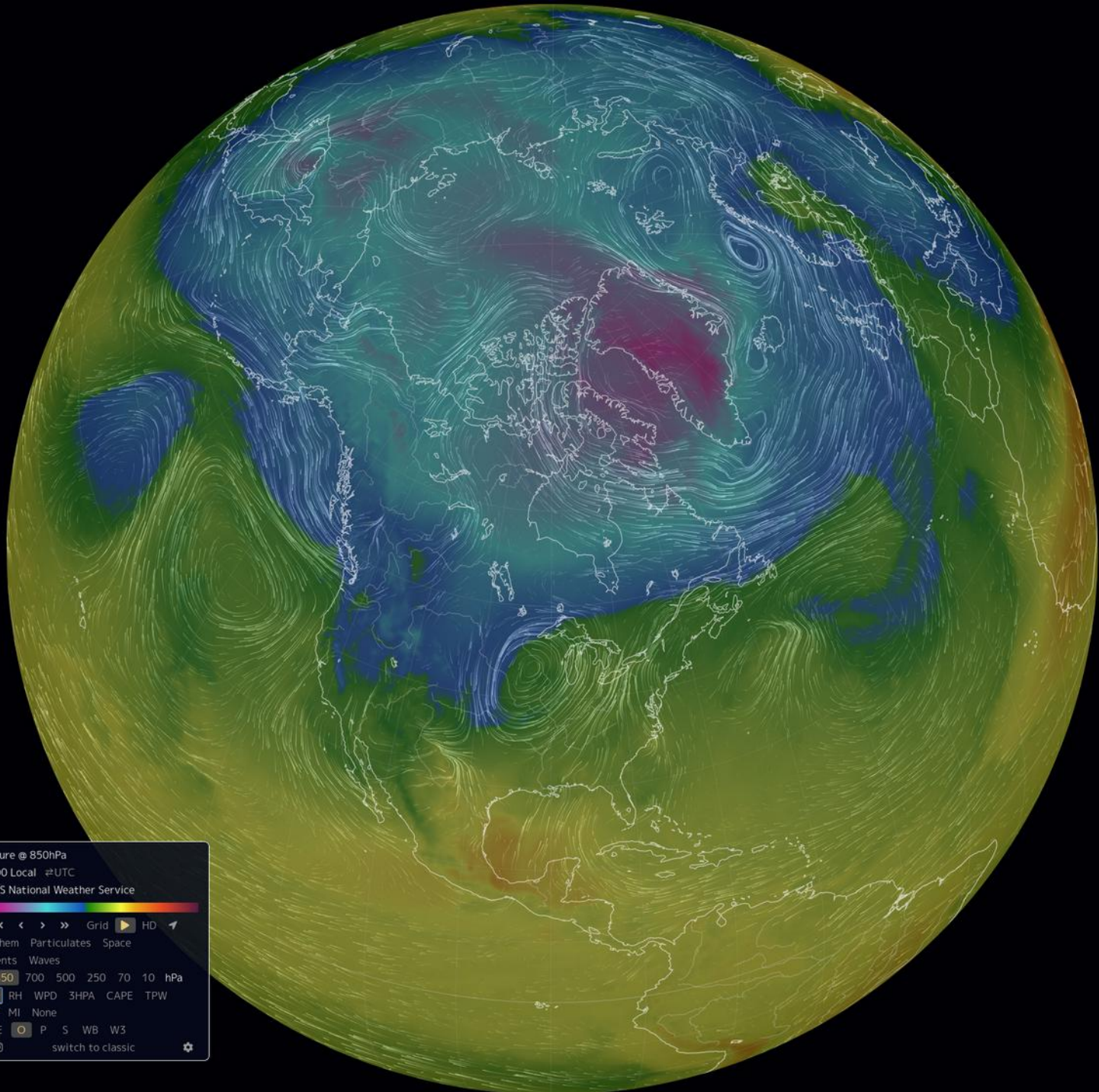
Projection | A CE E P S WB W3
about @ switch to classic




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. Projektcja 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 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

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.

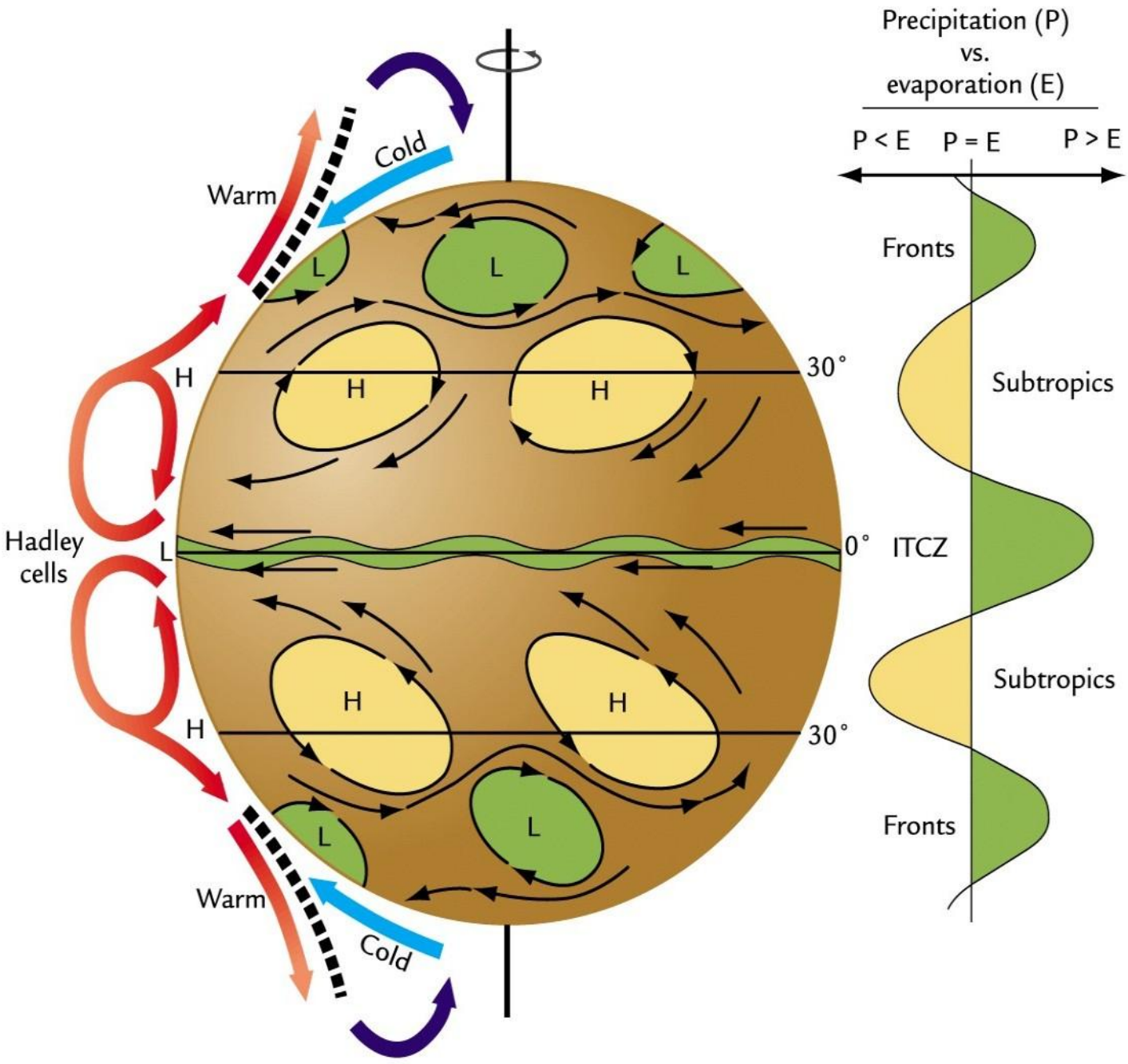
2. In extratropics:

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

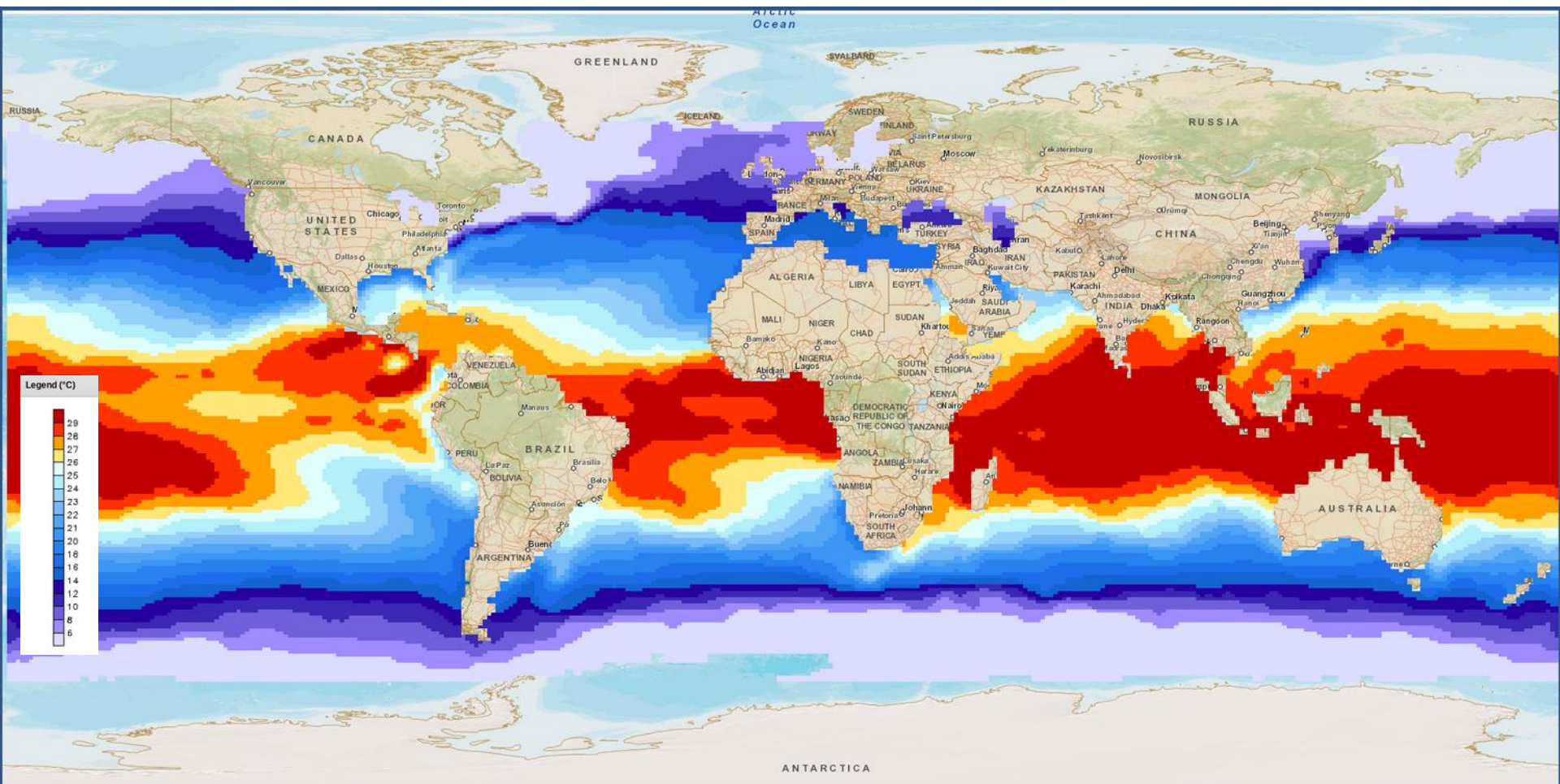


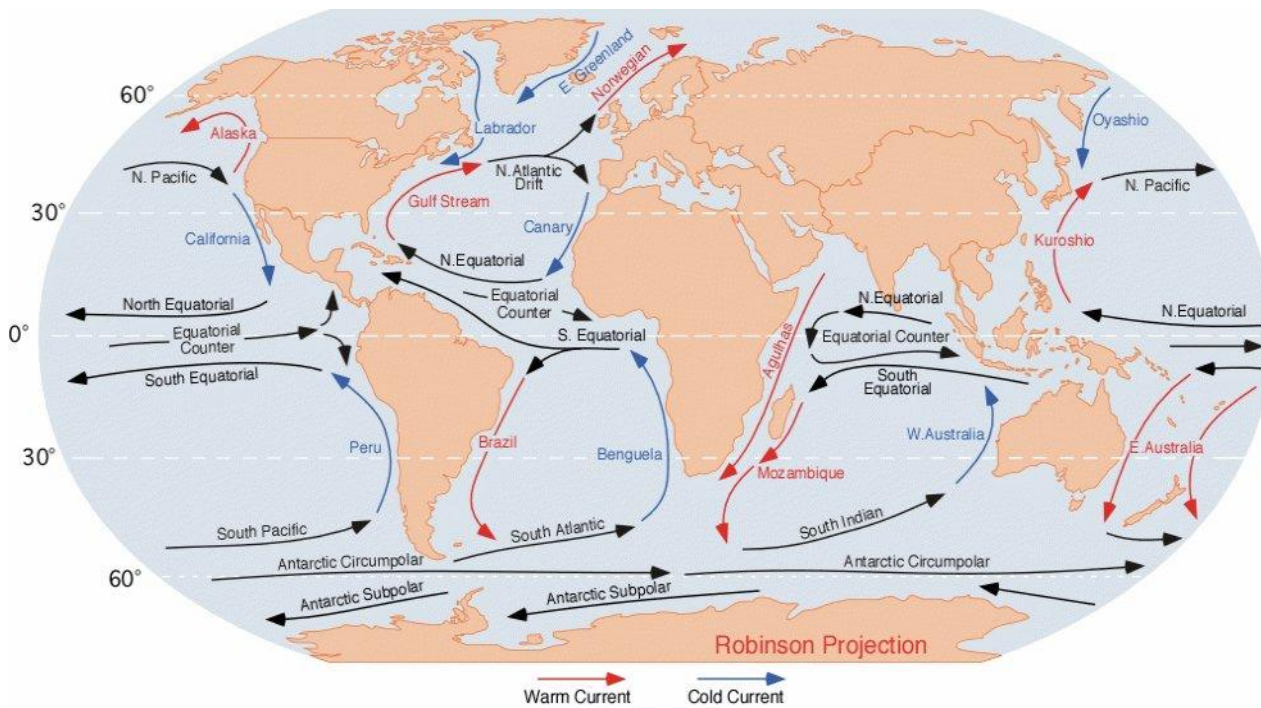
Ogólna cyrkulacja atmosfery: efektywny transport ciepła od równika ku biegunom.

Diagram po prawej stronie pokazuje schematycznie efekty ciepła utajonego.

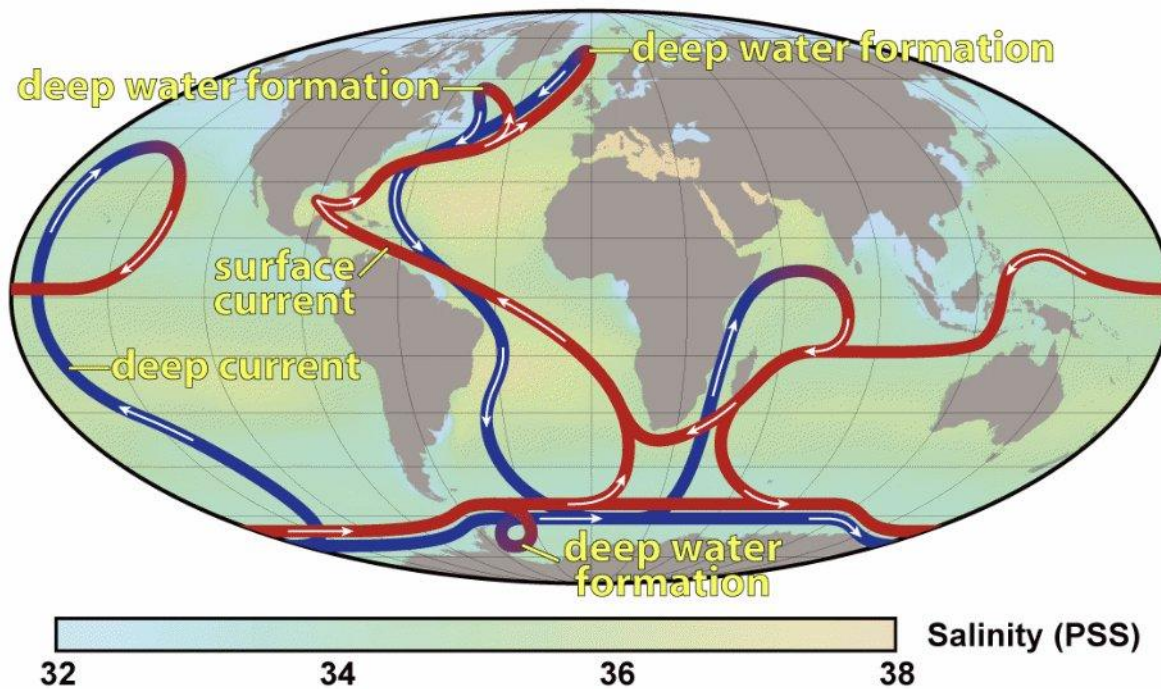
Temperatura powierzchni morza - SST (Sea Surface Temperature) - średnia tygodniowa, 04-11/03/2020.

Widać znaczne odchylenia od strefowości.

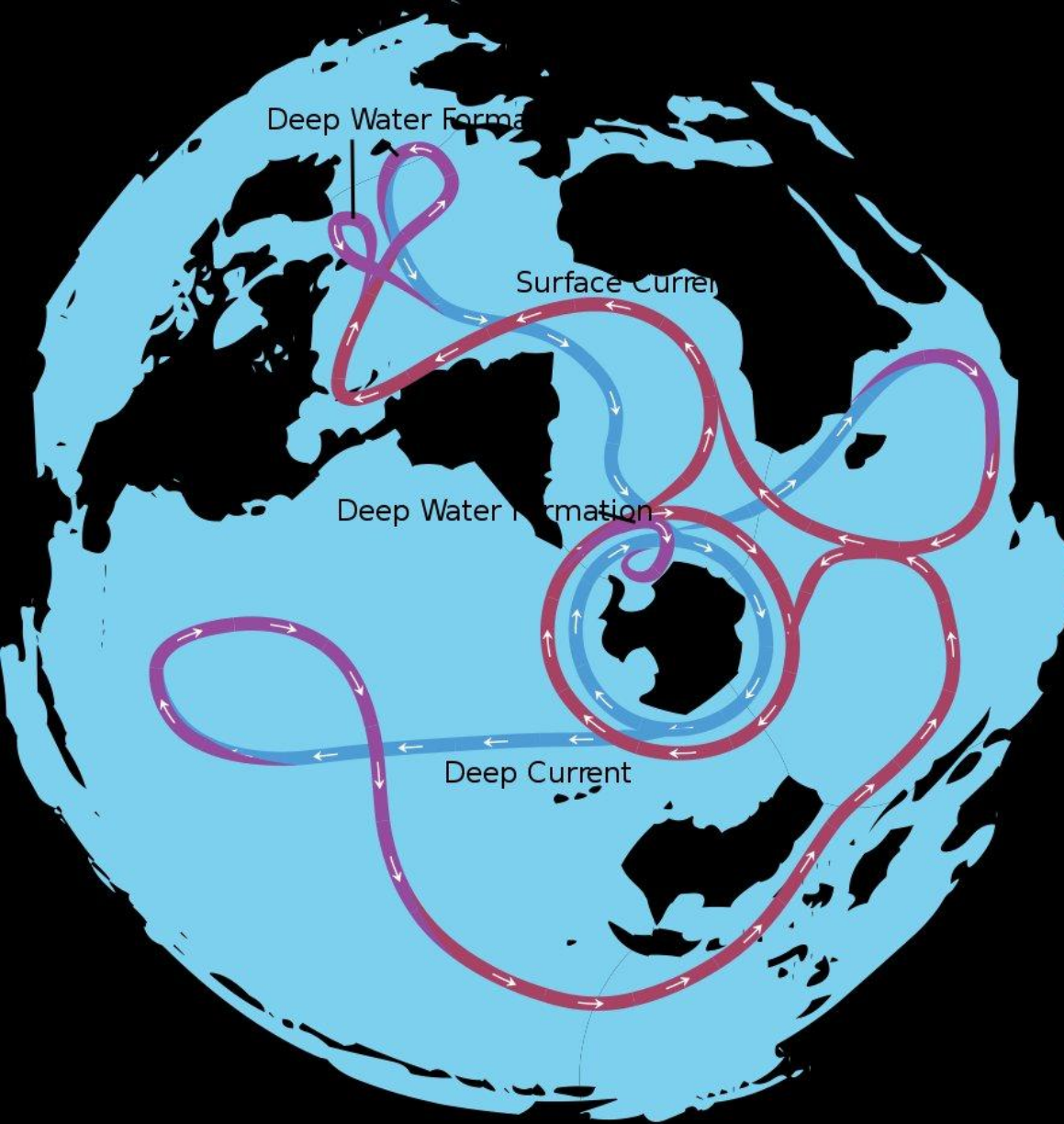




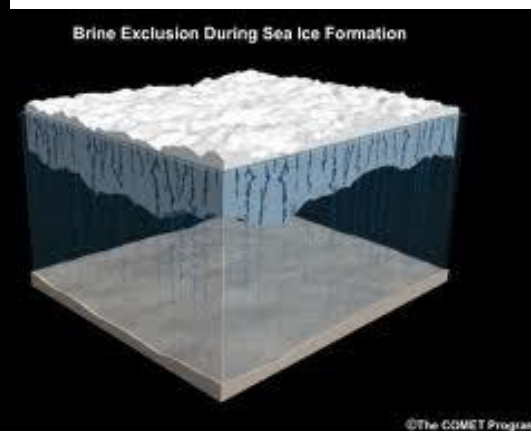
Powierzchniowe prądy morskie. Kolorami oznaczono względną temperaturę wody: czerwień - prąd ciepły, błękit - prąd chłodny.



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).



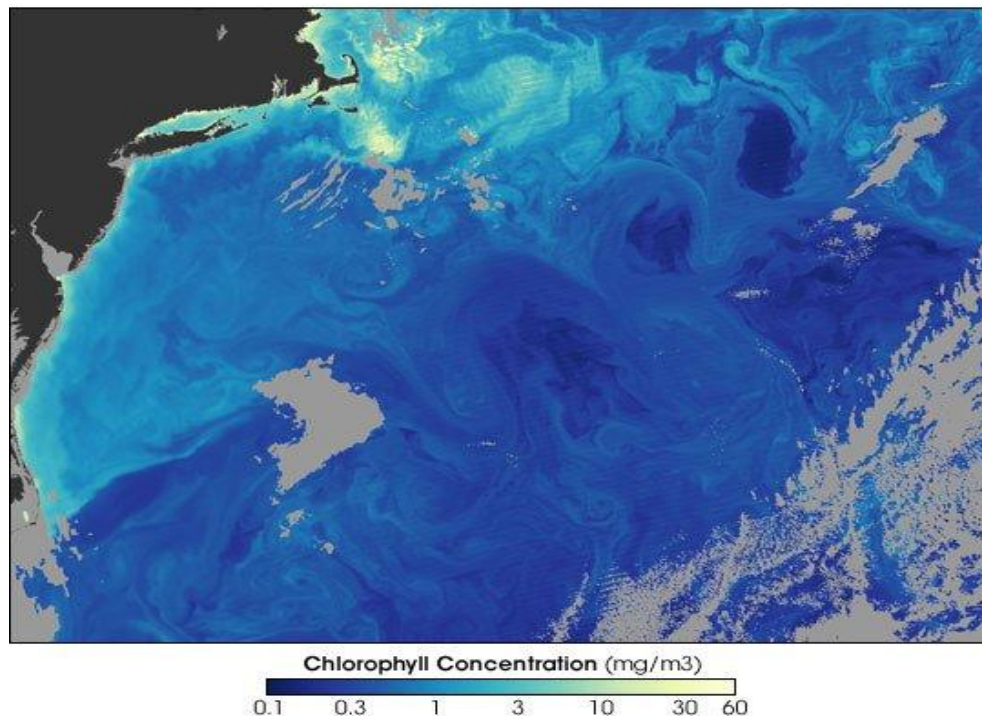
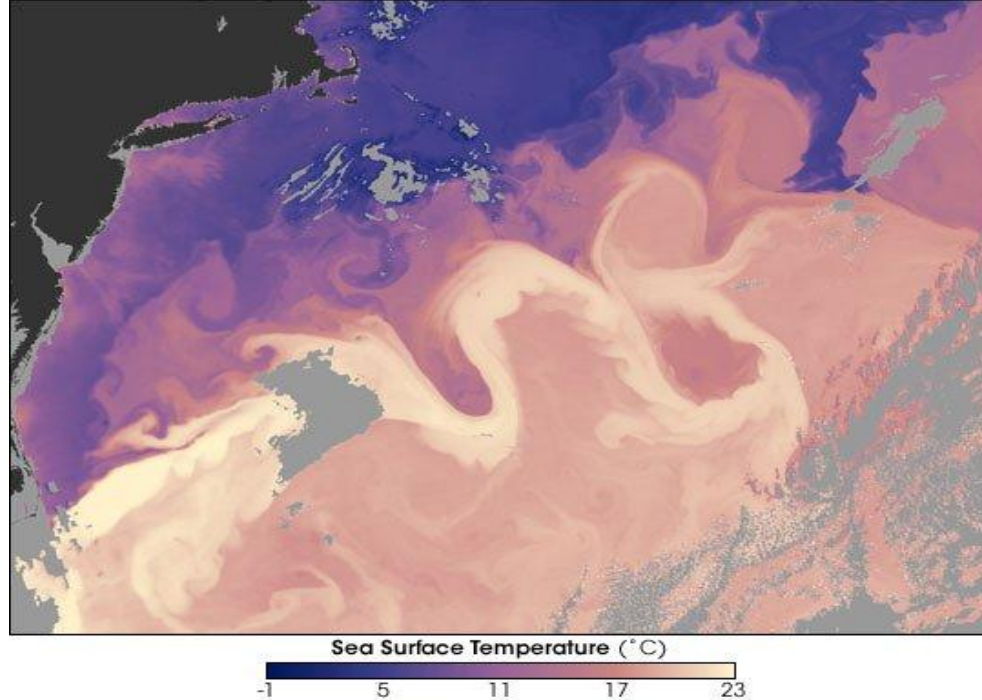
Cyrkulacja termohalinowa: „wielka pętla”



Powstawanie solanki podczas zamarzania wody morskiej

Prąd
zatokowy –
Golfsztrom

- widać
cyrkulacje
inercyjne
(mniejsze
pętle)



How Do We Understand the Coriolis Force?



Anders Persson

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, Berkshire, United Kingdom

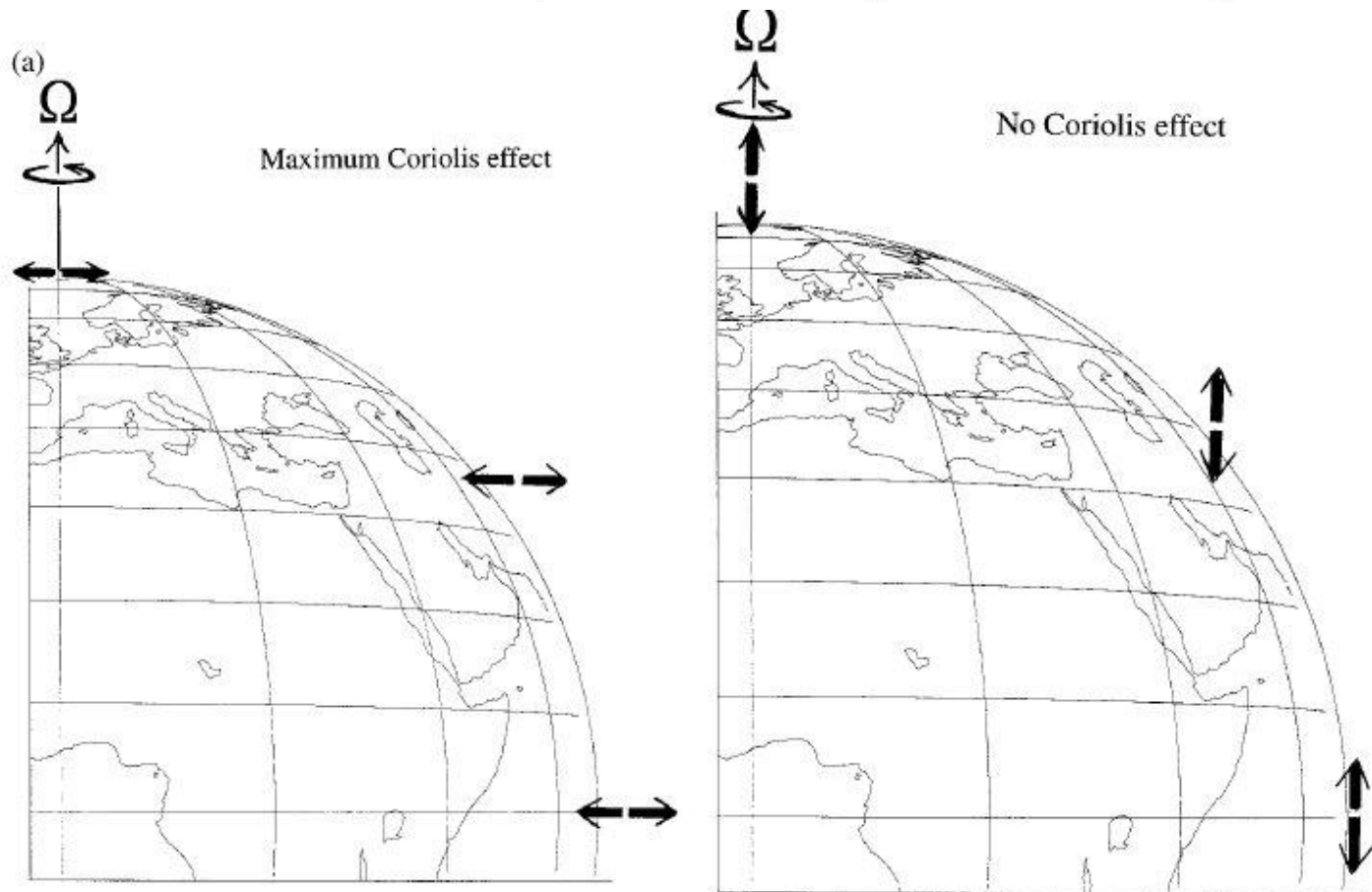


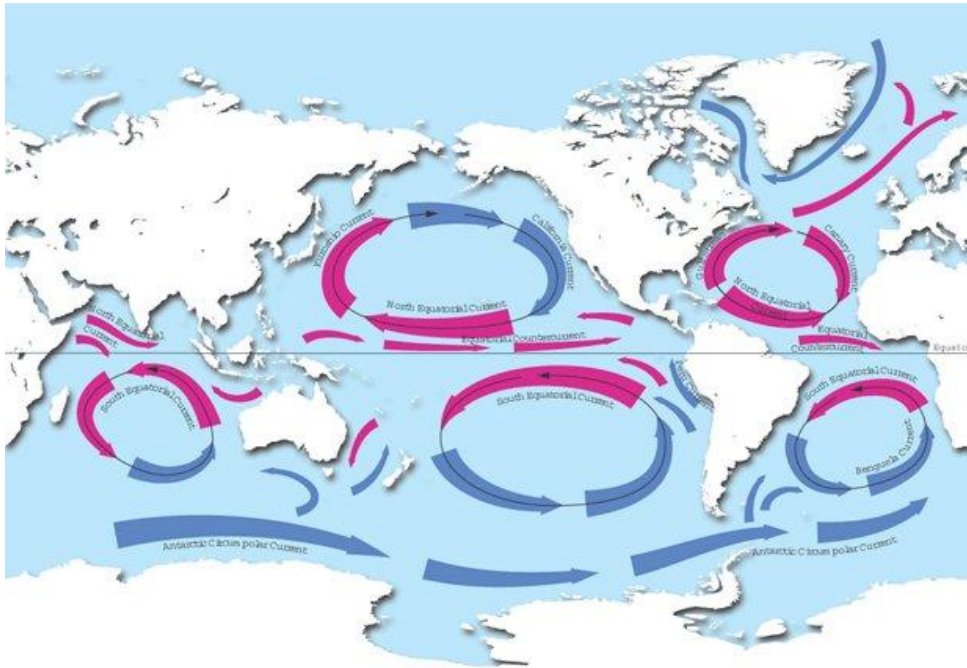
FIG. 1. Since the Coriolis force is the cross product between the rotational vector of the earth (Ω) and the velocity vector, it will take its maximal values for motions perpendicular to the earth's axis (a) and vanish for motions parallel to the earth's axis (b). Affected by a maximal Coriolis force is, for example, air rising equatorward (or sinking poleward) in the midlatitudes. The Coriolis force vanishes for air rising poleward (or sinking equatorward). Horizontal west-east winds on the equator are indeed affected by the Coriolis force, although the deflection is completely in the vertical direction.

2. Ruch inercjalny - $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$:

$$\frac{V^2}{R} + fV = 0$$

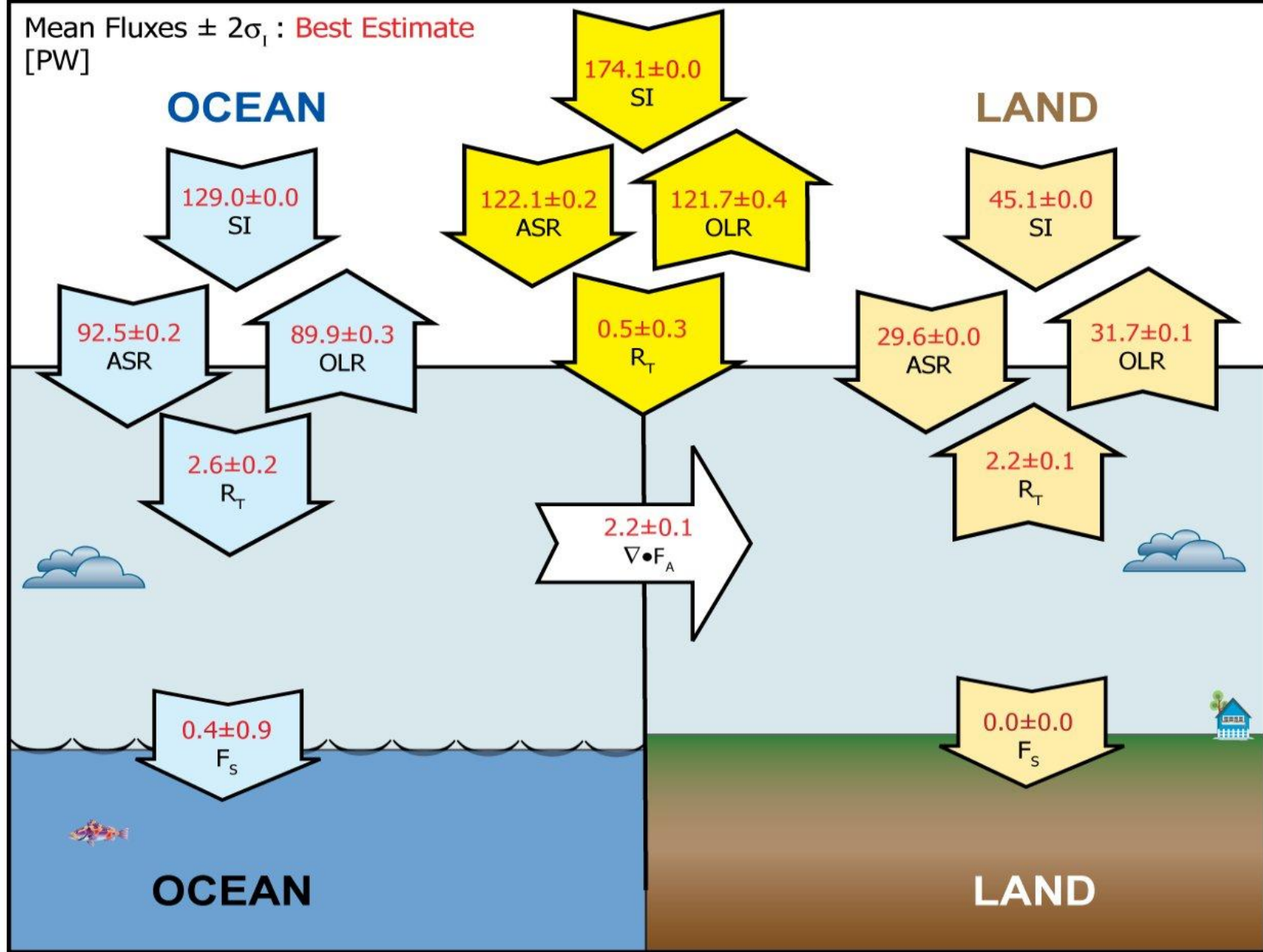
Stąd: $V = -fR$

Przepływ jest antycykloniczny (na półkuli północnej $R < 0$).



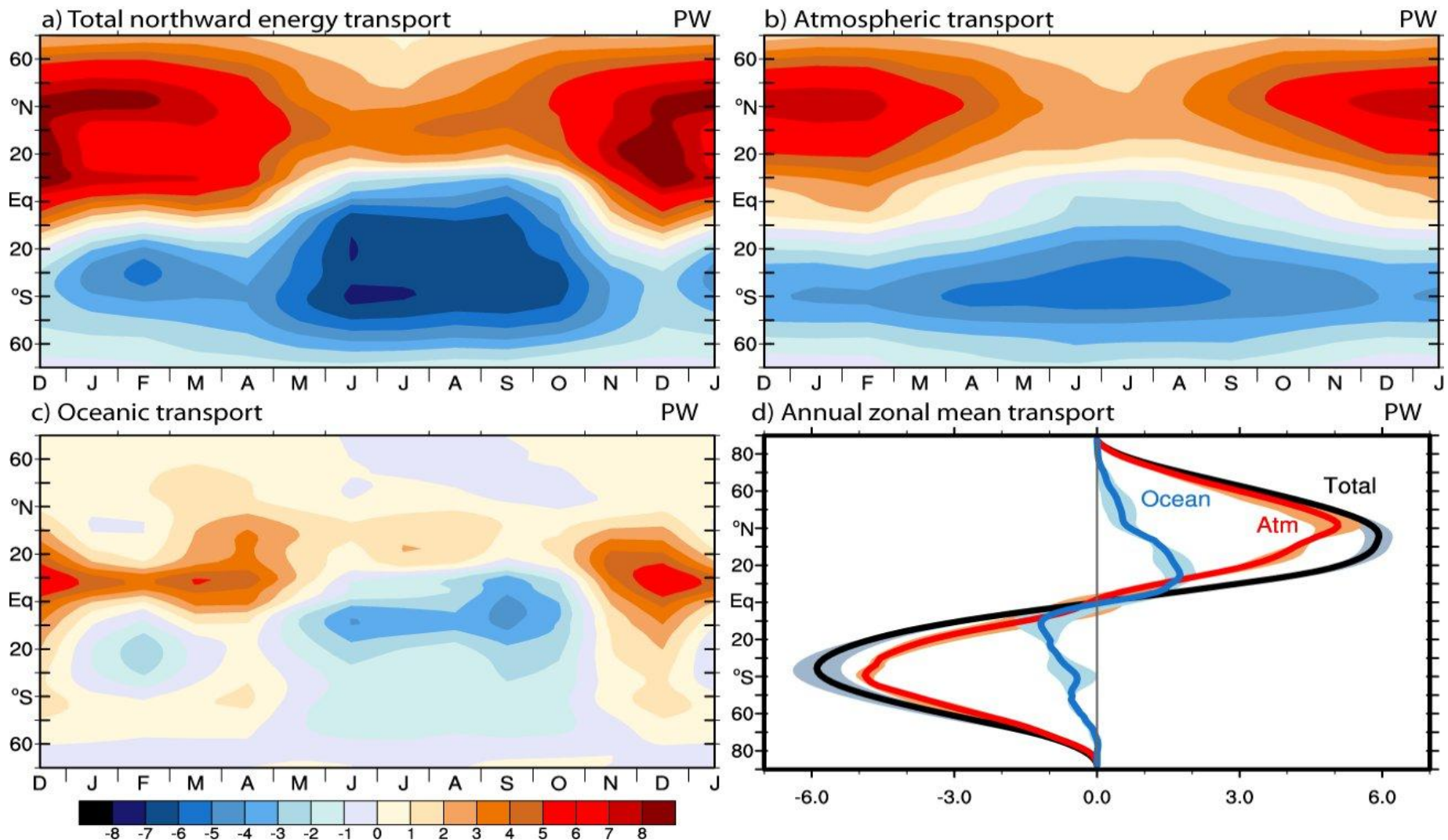
Surface Ocean Currents





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

Fasullo and Trenberth, 2008a.



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).

Fasullo, J. T., and K. E. Trenberth, 2008: The annual cycle of the energy budget. Part II: Meridional structures and poleward transports. *J. Climate*, 21, 2313-2325.