



Fizyka Pogody i Klimatu

Wieloskalowość przepływów, cyrkulacje

Szymon, Malinowski, Krzysztof Markowicz
Instytut Geofizyki
Uniwersytet Warszawski

Równania dynamiki dla przepływu powietrza:

- równania Naviera–Stokesa (równania ruchu) określające prawo zachowania pędu,
- równanie ciągłości wyrażające prawo zachowania masy,
- równanie dopływu ciepła – prawo zachowania energii,
- równanie transportu wilgoci (zachowanie wody).

Równania Naviera–Stokesa są formą II zasady dynamiki Newtona dla ośrodków ciągłych:

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g\delta_{i3} - 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}.$$

W zapisie zastosowano sumowanie po powtarzających się indeksach (konwencja sumacyjna) oraz wykorzystano popularne tensory δ_{ij} (delta Kroneckera) i ε_{ijk} (tensor Levi–Civita). Ze względu na wektorowy charakter prędkości wiatru, $u = (u_1, u_2, u_3)$ (lub w innej notacji: $u = (u, v, w)$), zapis ten zawiera układ 3 równań poszczególnych składowych wiatru ($i = 1, \dots, 3$).

Pierwszy składnik po prawej stronie oznacza przyspieszenie wywołane siłą gradientu ciśnienia p (ρ – gęstość powietrza); drugi to wpływ przyśpieszenia grawitacyjnego g ; trzeci jest wynikiem działania siły Coriolisa powstającej pod wpływem ruchu obrotowego Ziemi ($\Omega = [0, \omega \cdot \sin(\varphi), \omega \cdot \cos(\varphi)]$ – wektor prędkości kątovej, $\omega = 2\pi/24h$, φ – szerokość geograficzna). Ostatni składnik jest wynikiem działania powierzchniowych sił deformacji powstających na skutek tarcia molekularnego.

Wieloskalowość przepływów atmosferycznych

Pogoda związana jest z ruchami (przepływami, cyrkulacjami) powietrza w atmosferze: począwszy od ogólnej cyrkulacji atmosfery, przez wyże i nize, cyklony tropikalne, tornada, cyrkulacje lokalne (jak bryza), szkwały, porywy i podmuchy wiatru. Każdy z tych przepływów występuje na obszarze o określonej wielkości, od tysięcy kilometrów po setki i dziesiątki metrów. Dokładniejsze pomiary szybkimi anemometrami pokazują, że w atmosferze występują też przepływy w mniejszych skalach (nawet pojedynczych milimetrów).

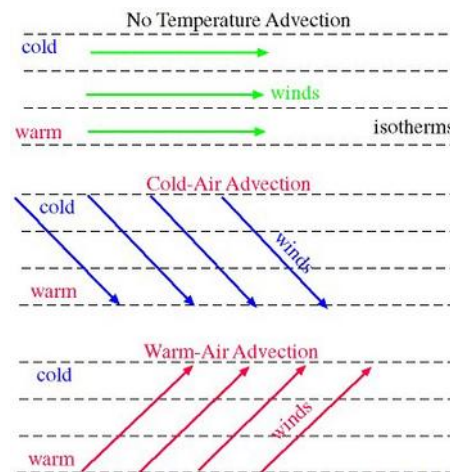
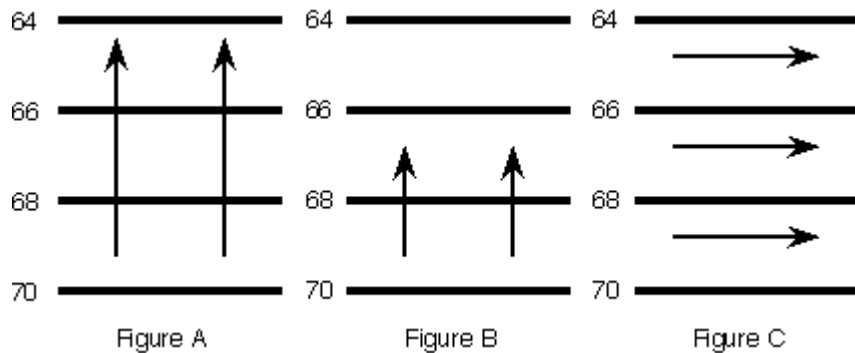
Dopiero w najmniejszych skalach wpływ lepkości powietrza powoduje, że ruch staje się „gładki” i nie można wyróżnić w nim już mniejszych struktur. Przepływy we wszystkich skalach oddziałują ze sobą, wymieniając energię. Mówimy, że przepływy atmosferyczne są **turbulentne** - cyrkulacje rozpadają się na mniejsze zawirowania, energia kinetyczna przepływu transportowana jest w dół skali.

Dopiero w zawirowaniach o skali milimetrów energia kinetyczna ulega dyssypacji (zamienia się w ciepło). Dodatkowo w przepływach atmosferycznych energia kinetyczna może być produkowana w różnych skalach z energii cieplnej (np. nierównomiernego ogrzewania czy przemian fazowych wody) bądź z energii potencjalnej.

Typy przepływów	Skala pozioma (m)	Nazwa skali
	10^{-7} m (0.1 μ m)	średnia droga swobodna
przepływy bezwirowe	10^{-3} m (1mm)	
najmniejsze wiry	10^{-2} m (1cm)	turbulencja
małe wiry	10^{-1} m (10cm)	
zawierania unoszące pył	1-10m	
podmuchy wiatru	10-100m	
tornada, drobne wiry konwekcyjne	100-1000m	
chmury konwekcyjne, chmury Cumulonimbus	10^3 - 10^4 m (1-10km)	mezoskala
mezoskalowe systemy konwekcyjne, fronty, linie szkwałowe	10^4 - 10^6 m (10-1000km)	
huragany	10^5 - 10^6 m (100-1000km)	skala synoptyczna
nize i wyze	10^6 m (1000km)	
cyrkulacja globalna	10^7 m (10000km)	skala globalna

Różne wielkości fizyczne: ciepło, wilgoć pęd są unoszone z przepływem.

Unoszenie wielkości ζ opisuje tzw. człon adwekcyjny, $\mathbf{U} \cdot \nabla \zeta$ w równaniach ruchu.

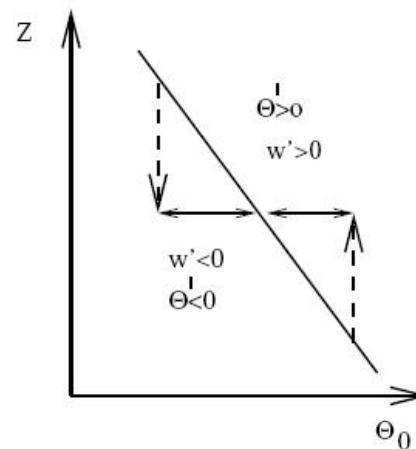
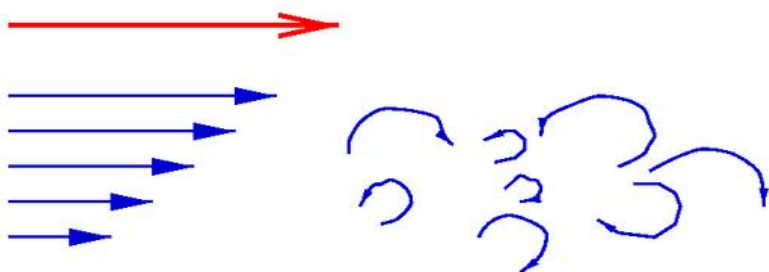


Ruch turbulentny charakteryzuje się fluktuacjami losowymi przepływu i unoszonych wielkości.

Transport wielkości fizycznych przez te fluktuacje jest wiele rzędów wielkości większy niż przez efekty molekularne (dyfuzję).

Strumień wielkości transportowanej przez te fluktuacje to średnia korelacja fluktuacji prędkości przepływu (w kierunku unoszenia) i fluktuacji tej wielkości:

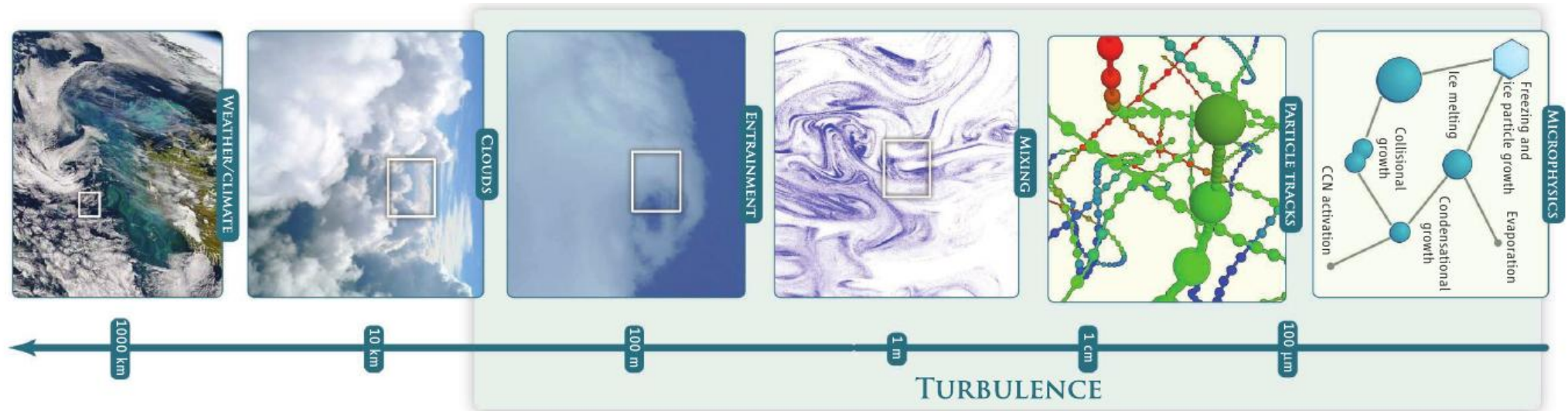
$$\langle u' \zeta' \rangle$$



Can We Understand Clouds Without Turbulence?

Advances at the interface between atmospheric and turbulence research are helping to elucidate fundamental properties of clouds.

E. Bodenschatz,^{1,2} S. P. Malinowski,³ R. A. Shaw,⁴ F. Stratmann⁵



WIKIPEDIA:

Turbulencja, przepływ burzliwy - określenie bardzo skomplikowanego, [nielaminarnego](#) ruchu [płynów](#). Ogólniej termin ten oznacza złożone zachowanie dowolnego układu fizycznego, czasem zachowanie [chaotyczne](#). Ruch turbulentny płynu przejawia się w występowaniu [wirów](#), zjawisku [oderwania strugi](#), zjawisku [mieszania](#). Dziedzinami nauki, które analizują zjawiska związane z turbulencją, są: [hydrodynamika](#), [aerodynamika](#) i [reologia](#). Model matematyczny turbulencji próbuje się tworzyć na bazie [teorii układów dynamicznych](#) i [teorii chaosu](#).

ENCYKLOPEDIA PWN:

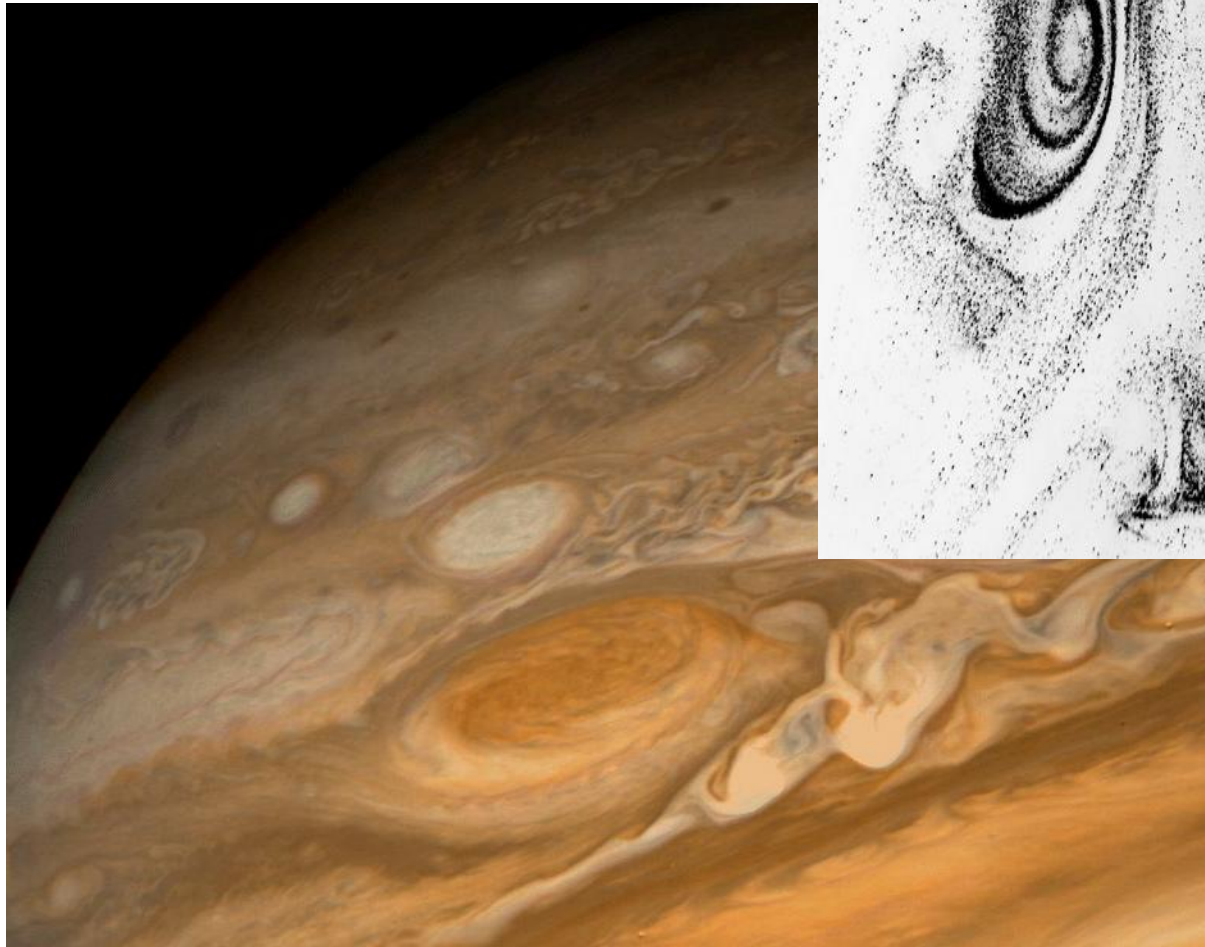
[turbulencja](#) [łac.], burzliwość, zjawisko polegające na występowaniu w przepływie nieuporządkowanych, przypadkowych ruchów elementów płynu.

[turbulencja w atmosferze ziemskiej](#), ruch powietrza, przy którym prędkość przepływu i ciśnienie, a często także np. temperatura i wilgotność powietrza, podlegają przypadkowym fluktuacjom w czasie i przestrzeni;

[burzliwość](#), fiz. → [turbulencja](#).

[fraktal](#) [łac. fractus ‘złamany’, ‘cząstkowy’], mat. rodzaj figury geom., płaskiej lub przestrzennej, zazwyczaj charakteryzującej się własnością samopodobieństwa — małe fragmenty f., oglądane w odpowiednim powiększeniu, wyglądają tak samo jak obiekt pierwotny.

Cechy przepływów turbulentnych:
obejmują wiele skal przestrzennych i
czasowych;
istotną rolę odgrywają w nich nieliniowe
efekty adwekcyjne;
są nieprzewidywalne;
są nieodwracalne.



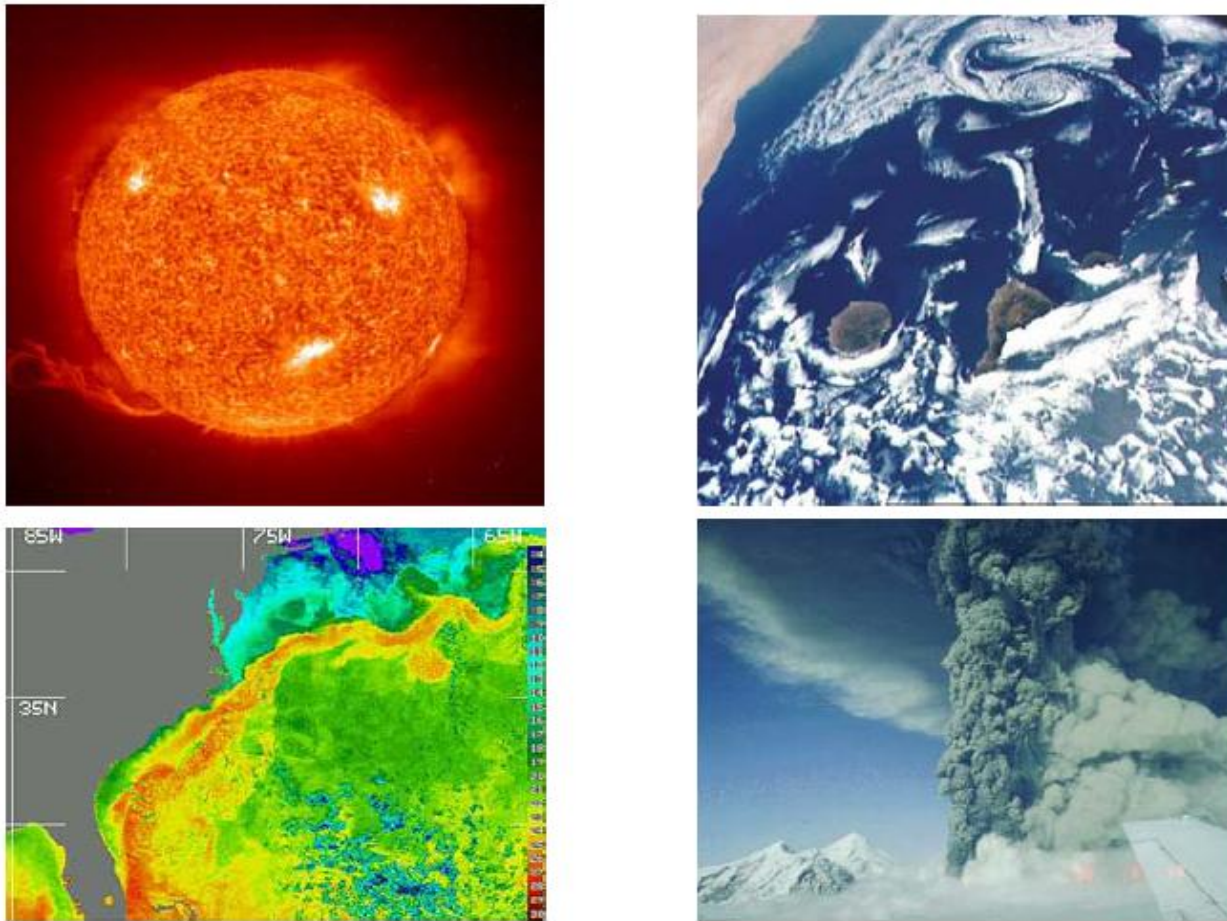


Figure 1.1: Examples of turbulent flows at the surface of the Sun, in the Earth's atmosphere, in the Gulf Stream at the ocean surface, and in a volcanic eruption.

Wielu autorów zwraca uwagę na istotne cechy przepływów turbulentnych:

występuje w nich gwałtowne rozciąganie wirów;
obserwuje się w nich kaskadę energii: energia kinetyczna fluktuacji pobierana jest z przepływu średniego i przenosi się do coraz mniejszych fluktuacji, a w najmniejszych fluktuacjach, tam gdzie lepkość zaczyna odgrywać istotną rolę dysypuje: zamienia się w ciepło.

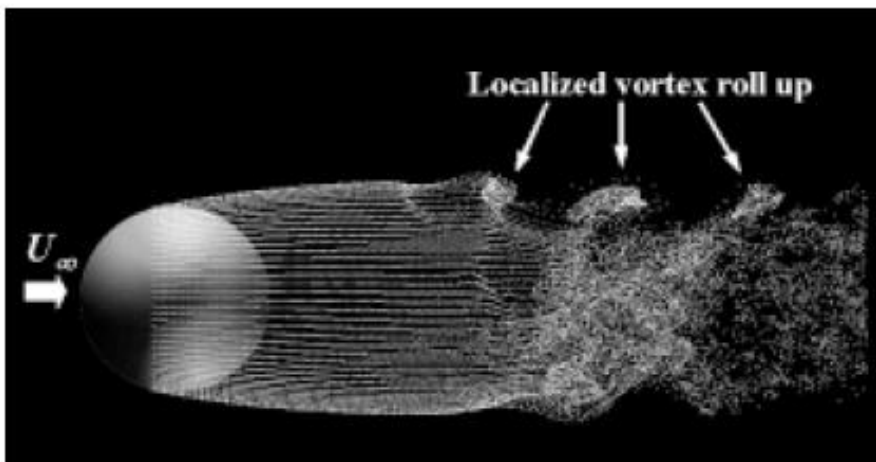


FIG. 1. $Re=3700$.

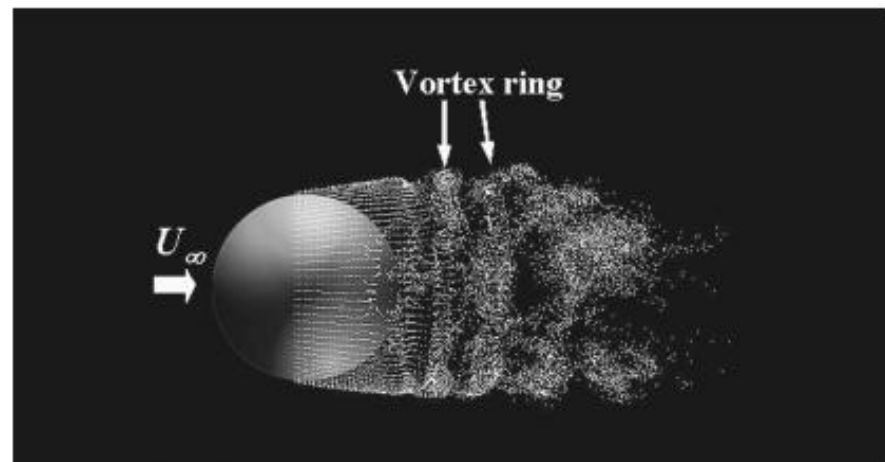
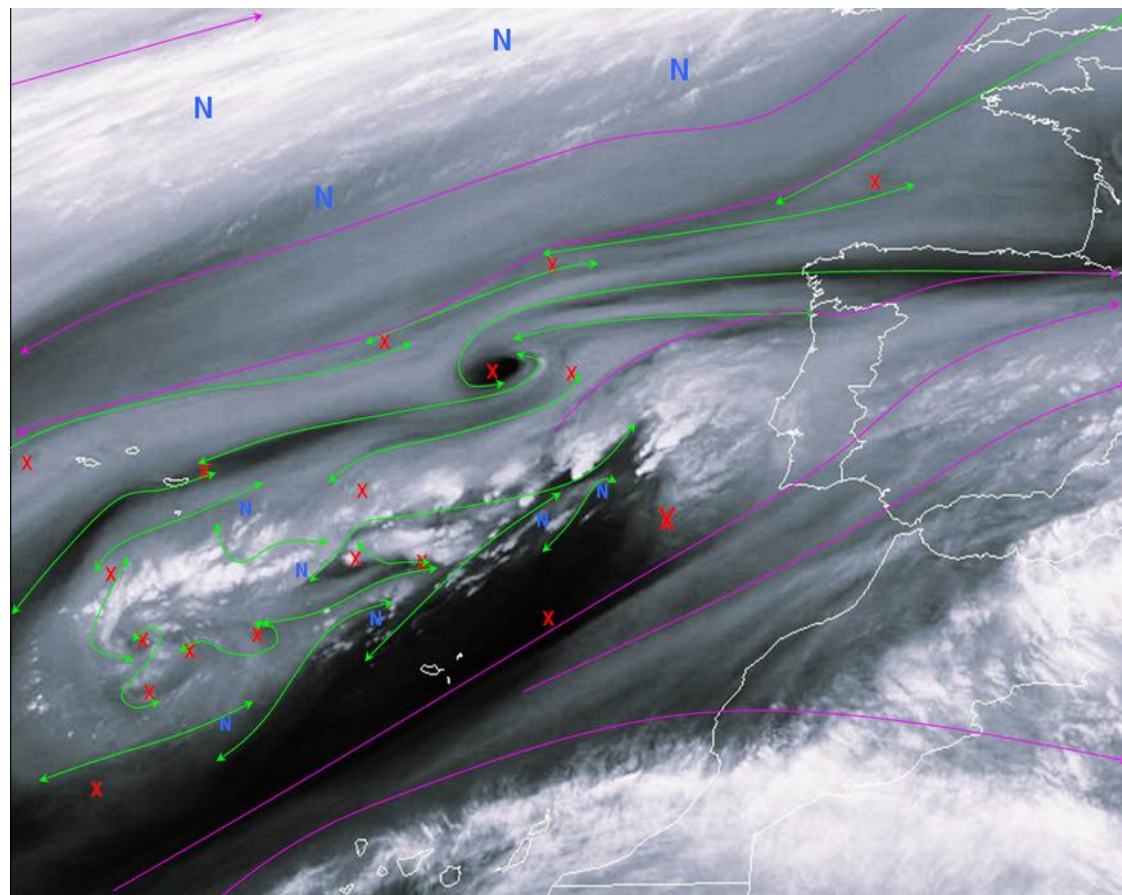
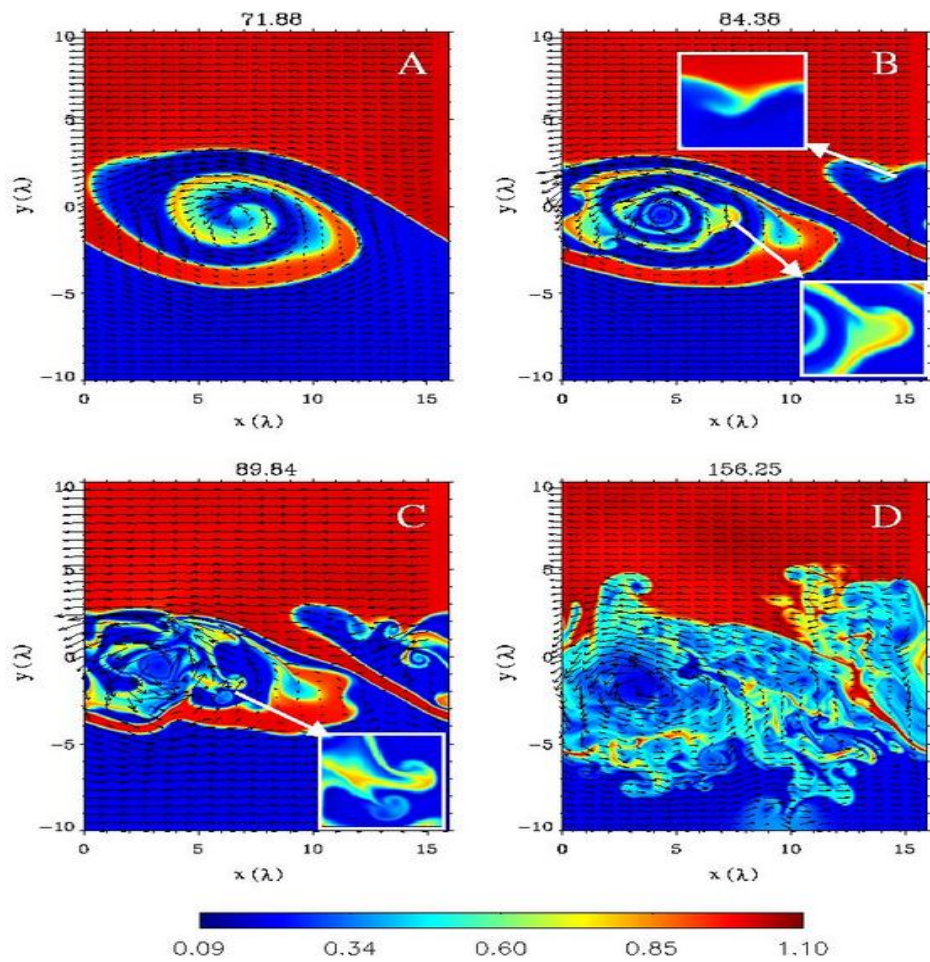


FIG. 2. $Re=10^4$.



Ze względu na turbulencyjny charakter ruchu w atmosferze wartości dowolnej wielkości ξ można uznać za superpozycję stosunkowo powolnych zmian wynikających z jej dobowej zmienności lub czynników synoptycznych i burzliwych fluktuacji (pulsacji) mających losowy charakter:

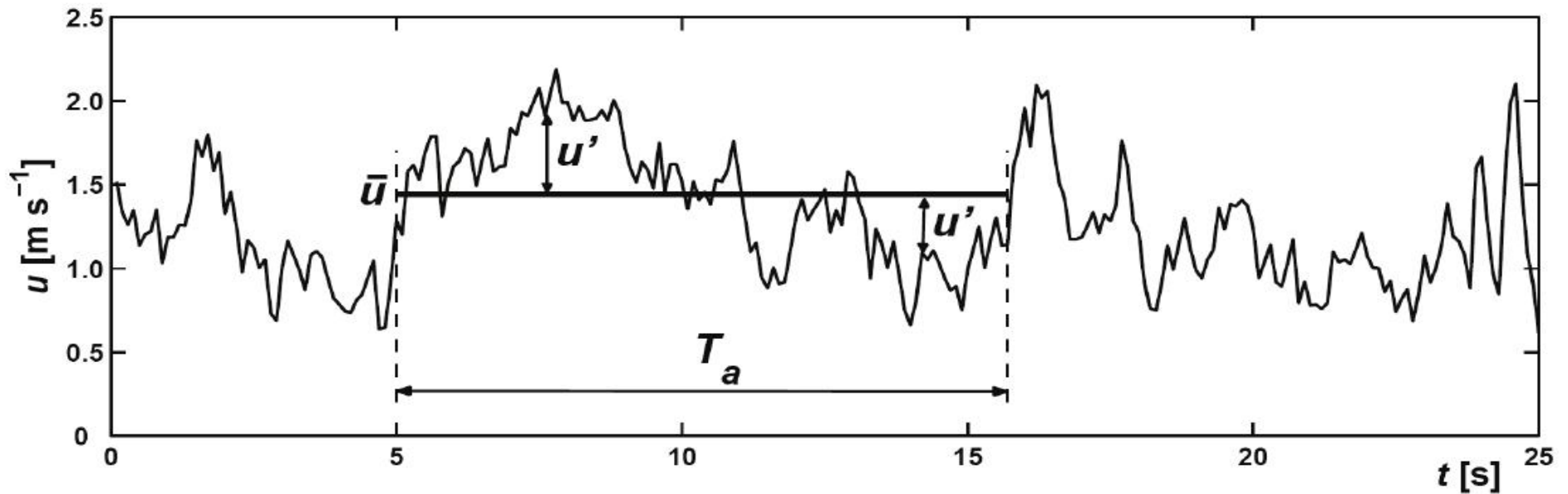
$$\xi = \bar{\xi} + \xi'$$

czyli dla podstawowych parametrów:

$u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$ – składowe prędkości wiatru

$\theta = \bar{\theta} + \theta'$ – temperatura potencjalna

$q = \bar{q} + q'$ – wilgotność właściwa.



Rozkład np. prędkości na wartość średnią (niezależną od czasu, ale mogącą zmieniać się w przestrzeni) i fluktuacje (odchylenia od tej średniej):

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}) + u'(\mathbf{x}, t) \quad [3]$$

Reguły uśredniania Reynoldsa:

$$\overline{\bar{f}} = \bar{f}$$

$$\overline{f + g} = \bar{f} + \bar{g}$$

$$\overline{f g} = \bar{f} \bar{g}$$

$$\overline{f g} \neq \bar{f} \bar{g}$$

$$\overline{\frac{\partial f}{\partial s}} = \frac{\partial \bar{f}}{\partial s}$$

Rozkład pól parametrów meteorologicznych na część średnią i fluktuacje zaproponowany przez Reynoldsa w końcu XIX w. (Reynolds 1894) ma kluczowe znaczenie dla badania dynamiki atmosfery. W praktyce bowiem nie jest możliwy ani dokładny pomiar wielkości chwilowych (każdy przyrząd pomiarowy cechuje się pewną bezwładnością czasową) ani ich numeryczna analiza (konieczność stosowania bardzo gęstej siatki dla dużego obszaru przekraczająca możliwości obliczeniowe komputerów).

Aby równania dynamiki atmosfery mogły być efektywnie wykorzystane muszą być przepisane dla wartości średnich. Kwestia uśredniania i określenia fluktuacji jest umowna i zależy od badanych skal przepływu.

Absolutne (zupelne) pochodne pojawiające się w równaniach są dla dowolnej wielkości ξ sumą zmian indywidualnych i adwekcyjnych (unoszenia przez przepływ):

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \xi}{\partial x_i}.$$

Wstawiają $\xi = \bar{\xi} + \xi'$ i uśredniając wykorzystując równanie ciągłości dostajemy:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\xi}'}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\xi}'}{\partial x_i} + \bar{u}_i' \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i' \xi'}{\partial x_i},$$

i dalej, korzystając z reguł uśredniania Reynoldsa (następny slajd) mamy:

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i' \xi'}{\partial x_i}$$

Widać, że procedura uśredniania Reynoldsa prowadzi do pojawienia się w równaniach dodatkowych czynników:

$$\overline{\partial u_i' \xi' / \partial x_i}$$

W równaniach dla wartości średnich zapisywane są one po prawej stronie i po dodatkowych uproszczeniach równania te przyjmują postać:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - g \delta_{i3} - f_C \varepsilon_{ij3} \bar{u}_j - \frac{\partial \overline{u_j' u_i'}}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0,$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho} c_p} \frac{\partial \bar{Q}_j^*}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_j' \theta'}}{\partial x_j},$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{u_j' q'}}{\partial x_j},$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} \bar{T}_v R.$$

Wielkości $\overline{u_j' u_i'}$, $\overline{u_j' \theta'}$, $\overline{u_j' q'}$ opisują turbulencyjny transport pędu, ciepła i wilgoci (statystycznie są to kowariancje składowych prędkości wiatru z analizowanymi zmiennymi).

Są to składowe **turbulencyjnych strumieni pędu, ciepła i wilgoci** wyrażone w tzw. formie kinematycznej.

Jeżeli za strumień danej wielkości uznamy jej ilość przepływającą w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni, to strumienie kinematyczne będą powiązane z tak zdefiniowanymi strumieniami pędu, M_i , (w $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), ciepła Q_H (w $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) i wilgoci, E (w $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

zależnościami:

$$\mathbf{M}_i = \rho \cdot [\overline{u'u_i'}, \overline{v'u_i'}, \overline{w'u_i'}],$$

$$Q_H = \rho \cdot c_p \cdot [\overline{u'\theta'}, \overline{v'\theta'}, \overline{w'\theta'}],$$

$$E = \rho \cdot [\overline{u'q'}, \overline{v'q'}, \overline{w'q'}].$$

Kinematyczna forma strumieni sugeruje prostą metodę pomiarów strumieni jako iloczynów fluktuacji (kowariancji) odpowiednich wielkości.

Dodatkowo turbulencyjne strumienie pędu definiują tzw. tensor naprężeń Reynoldsa, τ_R :

$$\tau_R = -\rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$



Strumienie takie jak $\langle u'w' \rangle$, $\langle v'w' \rangle$, $\langle w'\theta' \rangle$, $\langle w'q' \rangle$ mierzy się przy horyzontalnie jednorodnym przepływie.

Opisują one oddziaływanie powierzchni ziemi z atmosfera swobodną.

SIEBERT ET AL.

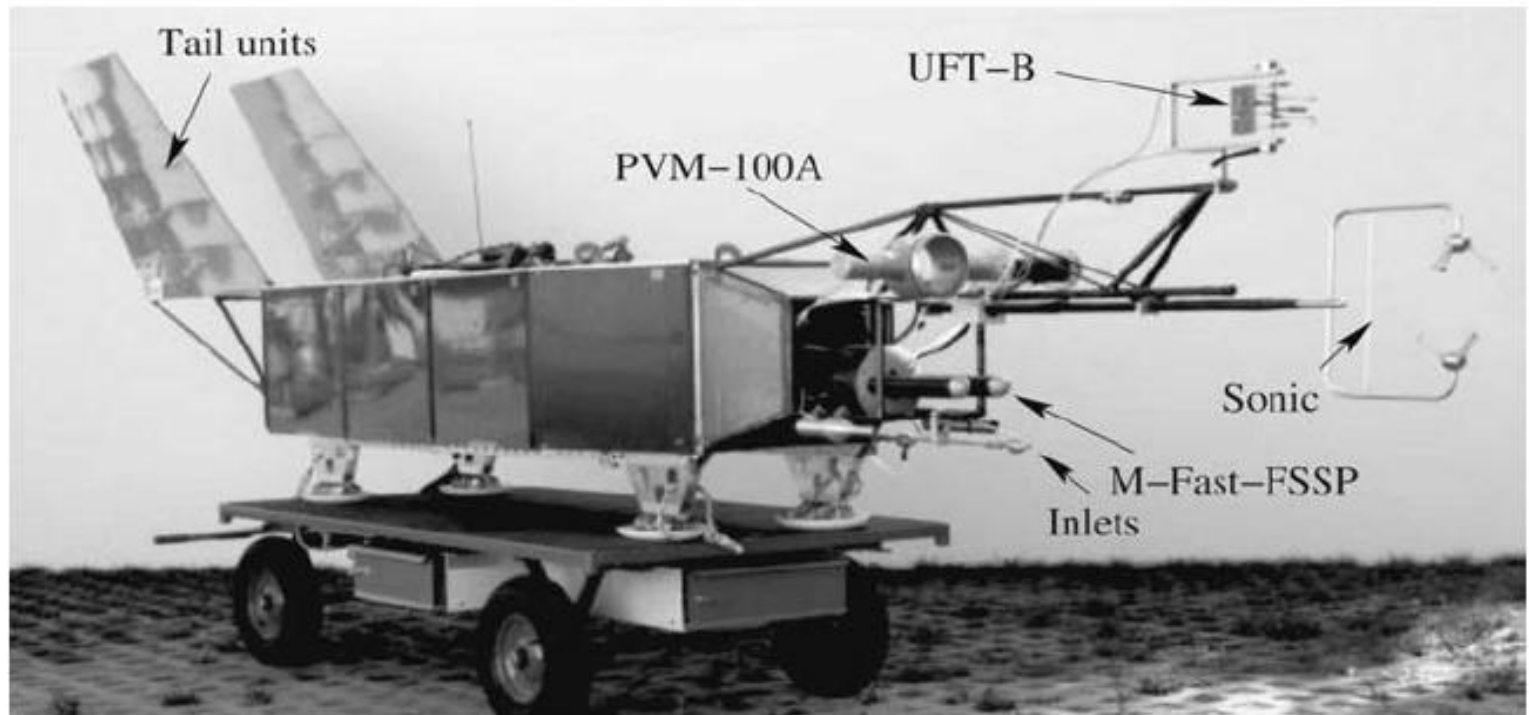


FIG. 1. The turbulence payload ACTOS with sonic, UFT-B, PVM-100A, and M-Fast-FSSP. Also shown are the inlets for humidity and aerosol particle measurements.

Przykłady pomiarów z platformy ACTOS. Korelacje fluktuacji u i w opisują strumienie pędu czyli wymianę pędu między warstwami turbulენტnej atmosfery.

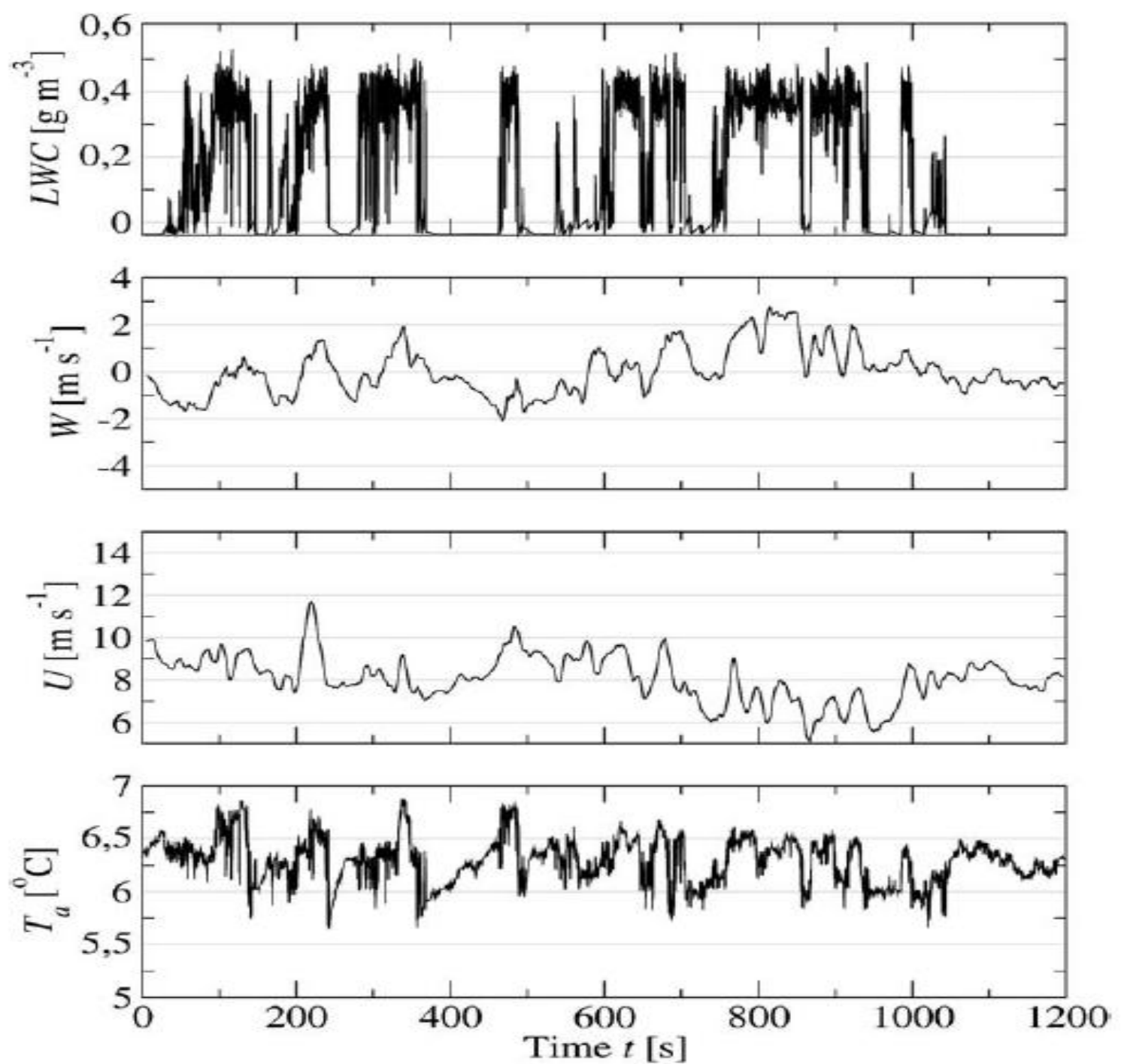
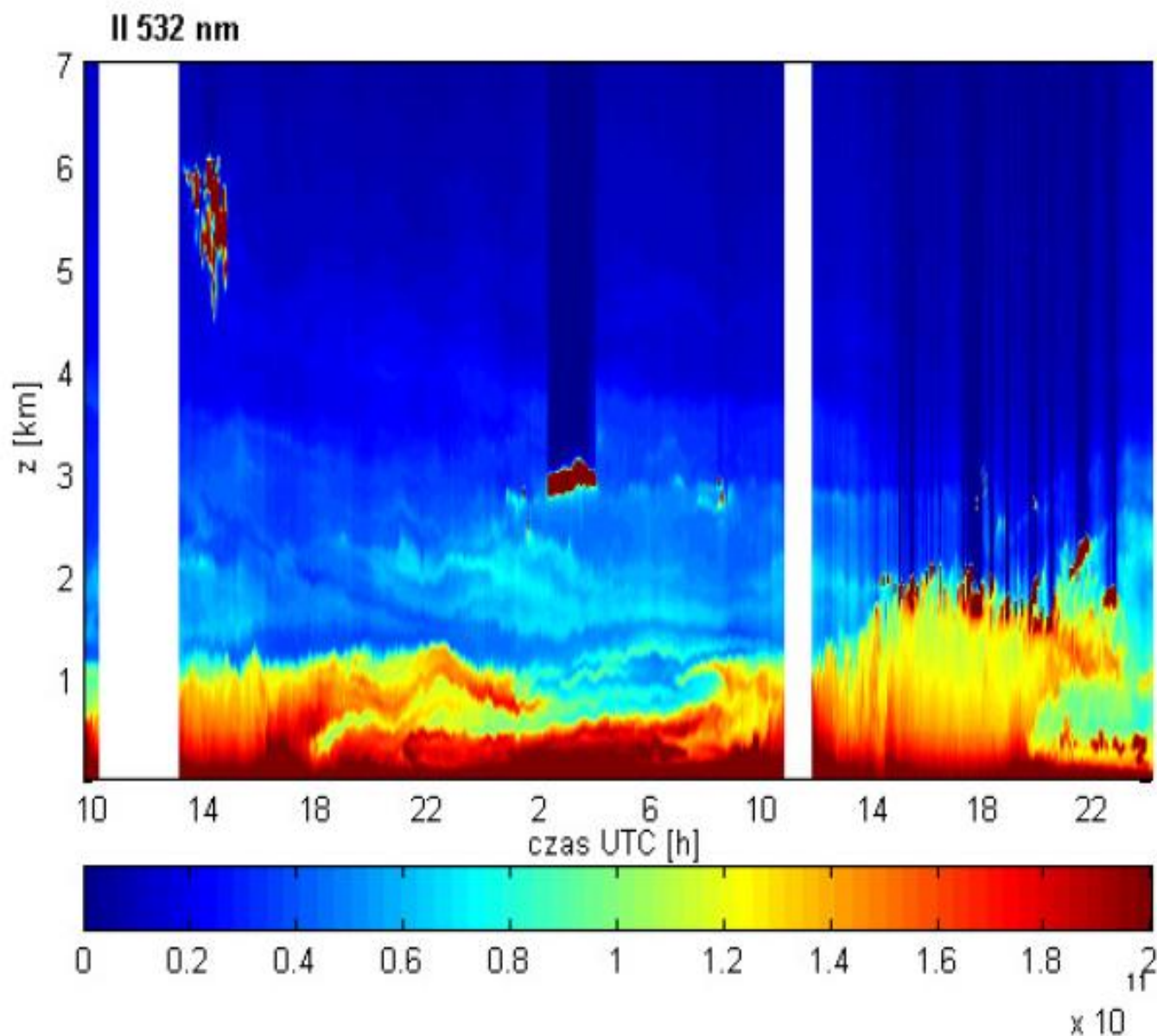
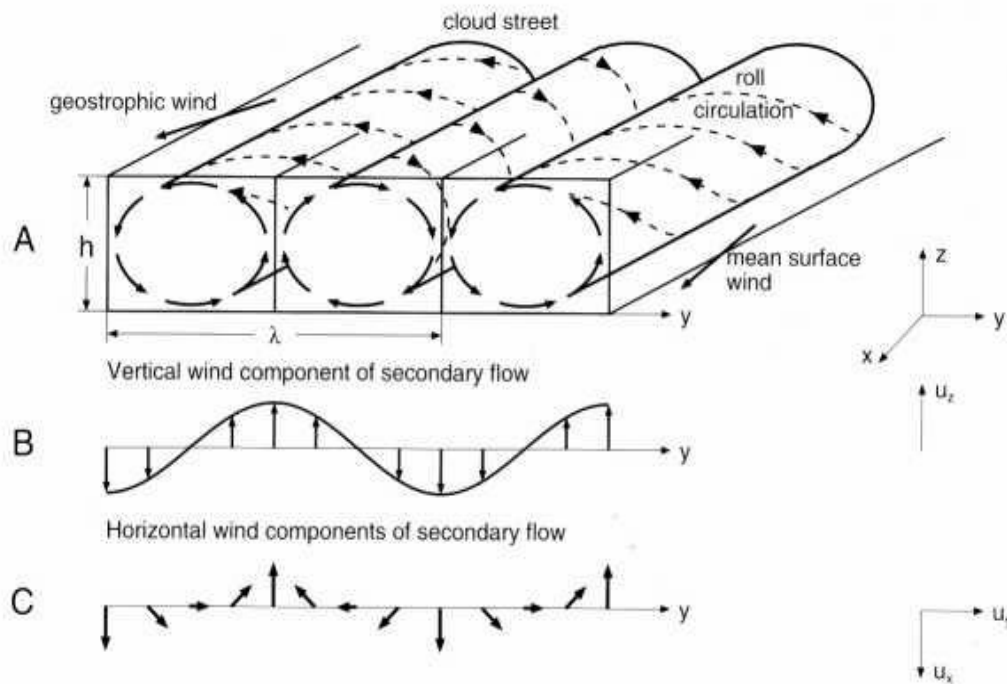


FIG. 3. Time series of LWC, vertical wind velocity W , horizontal wind velocity U , and temperature T_a as measured with ACTOS at a height of around 760 m AGL on 21 May 2003 during the BBC2 campaign.

Obszar w ciepłych kolorach to obszar gdzie pyły emitowane z powierzchni ziemi unoszone są z przepływem turbulentnym w górę: w dzień wyżej (obszar turbulencji związany z konwekcją, w nocy nisko (wąski obszar turbulencji blisko ziemi))



Rys. 8.7: Sygnały zarejestrowane przez Teramobile Profiler w dniach 13-14.04, kanał 532 nm, polaryzacja równoległa do polaryzacji wiązki emitowanej (natężenie w jednostkach umownych, zaznaczone kolorami).



Przykład zorganizowanego transportu konwekcyjnego: turbulencja + zorganizowane rolki konwekcyjne. Para wodna unoszona od powierzchni ziemi z przepływem kondensuje w górnej części prądów wstępujących i powstają chmury.

Rolki konwekcyjne





Przykłady pomiarów temperatury i wody w oddalonych przyrządach. W rzeczywistości skoki temperatury i wody są w tym samym miejscu.

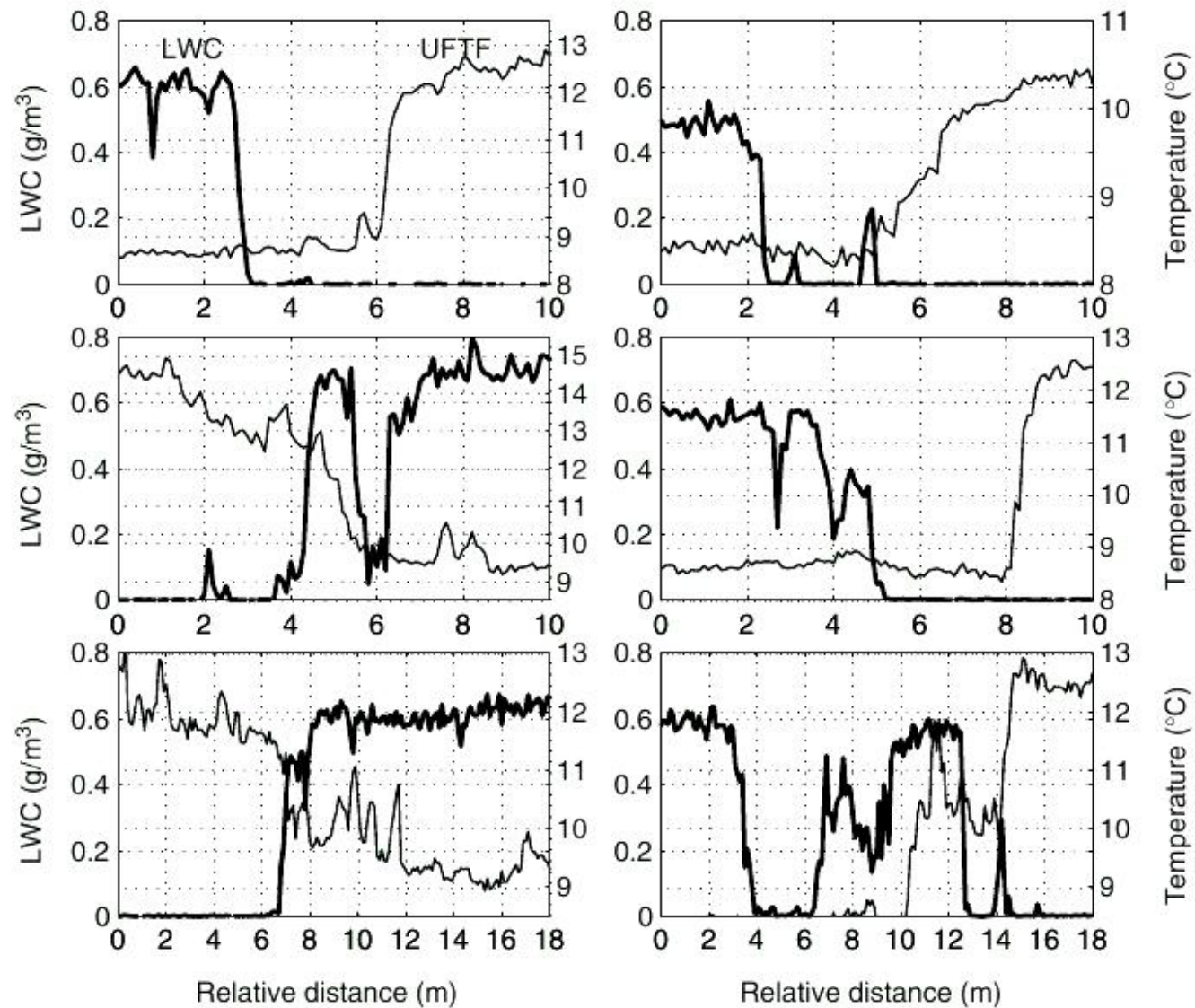
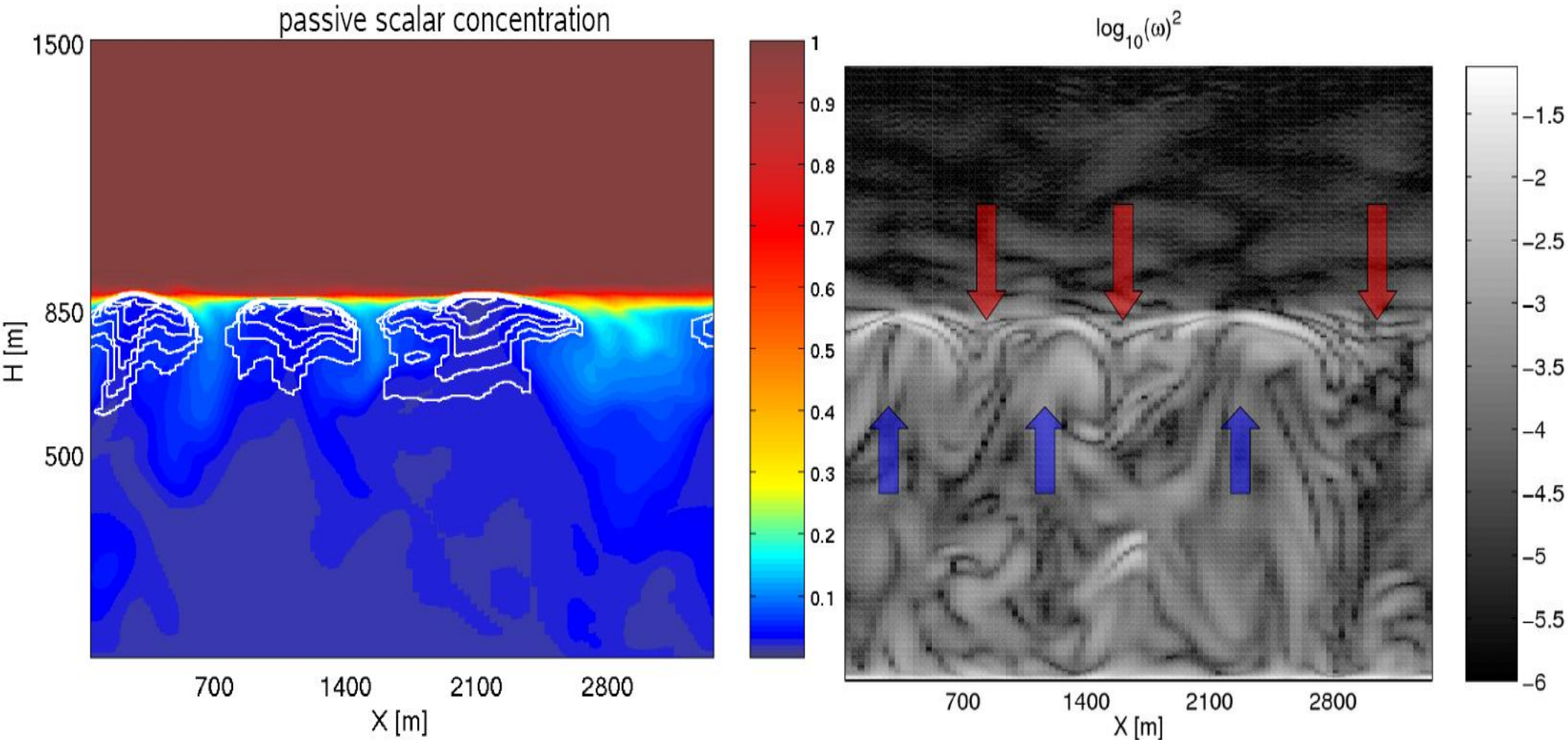


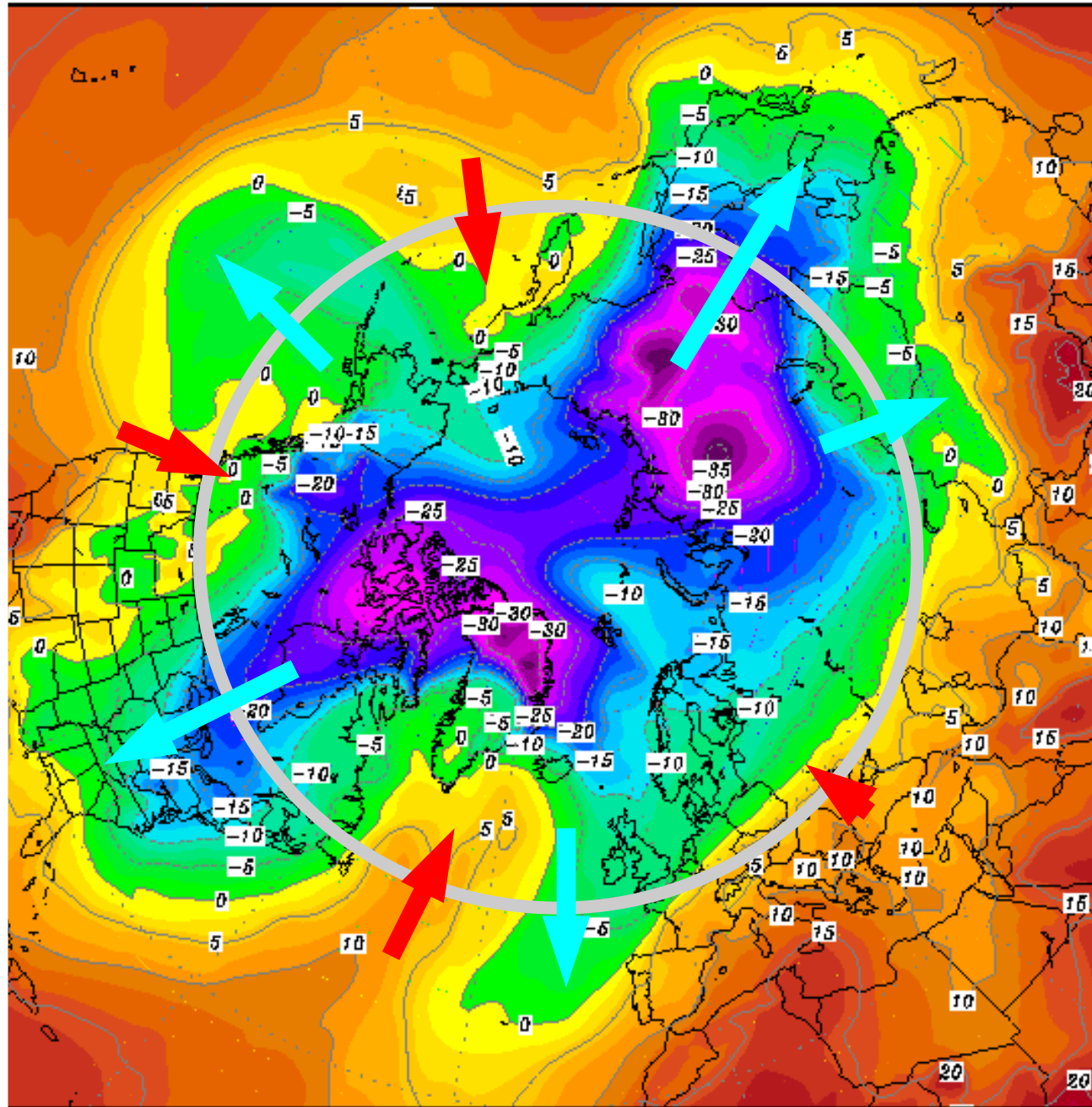
Figure 4. Examples of the cloud edge in 1000 Hz temperature (thin line) and LWC (thick line) records. Sharp jumps in LWC and temperature at distances of the order of 10 cm (data resolution) are currently observed. Notice a shift between the temperature and LWC records resulting from the 6 m separation between the instruments and the low pitch angle of the aircraft with respect to the cloud clear air interface.



W wirtualnej rzeczywistości modelu możemy wpuścić dodatkowy składnik unoszony z przepływem po to aby śledzić jak jest unoszony z płynem.

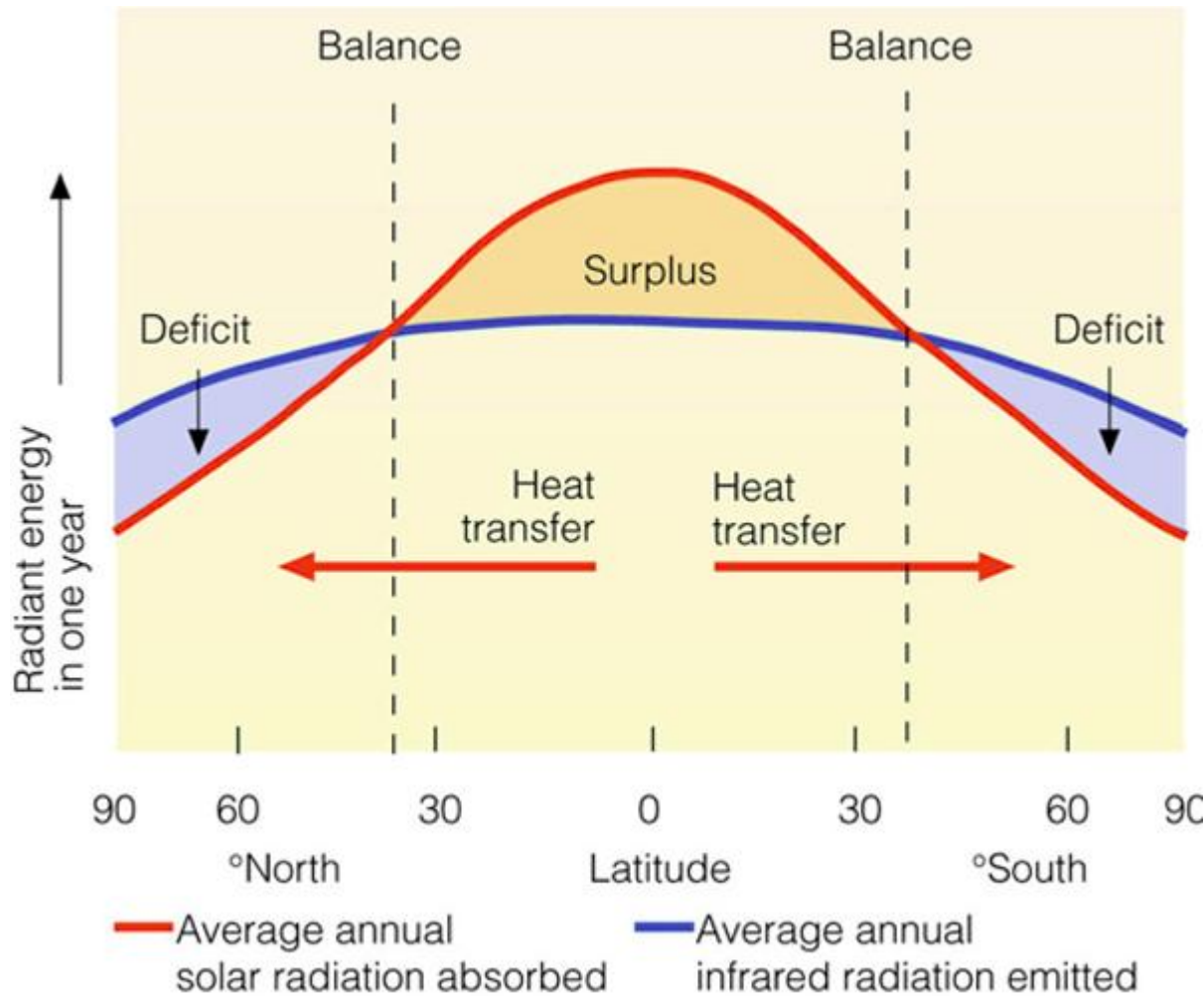
850 hPa Temperatur (Grad C) Mittelwert

Transport ciepła od równika do biegunów to też korelacja fluktuacja południkowej składowej prędkości wiatru z fluktuacja temperatury scałkowany wokół południka Przez który ten transport obliczamy.

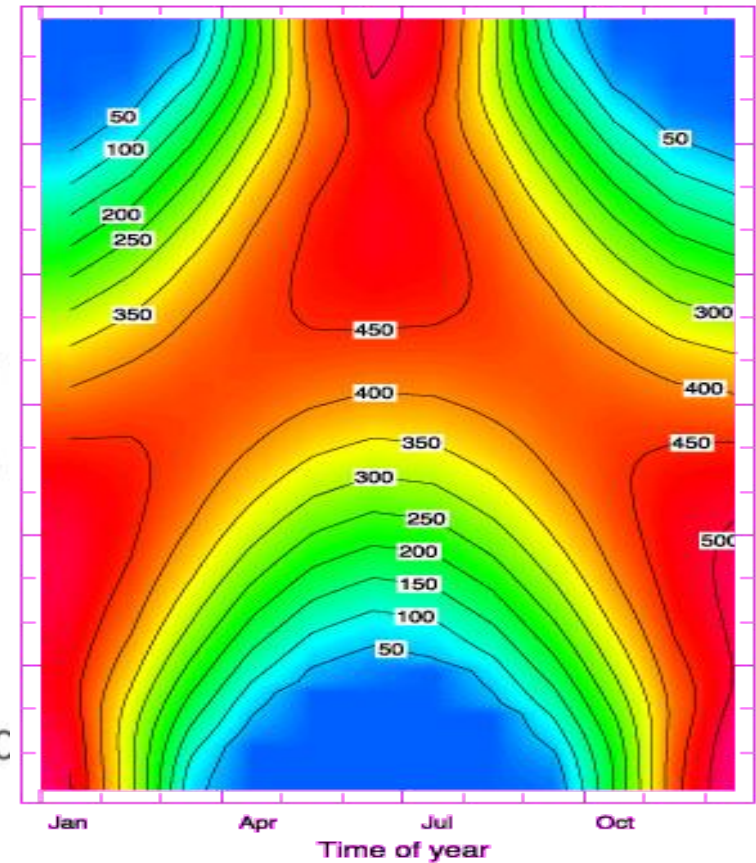


Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

Cyrkulacja ogólna atmosfery



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



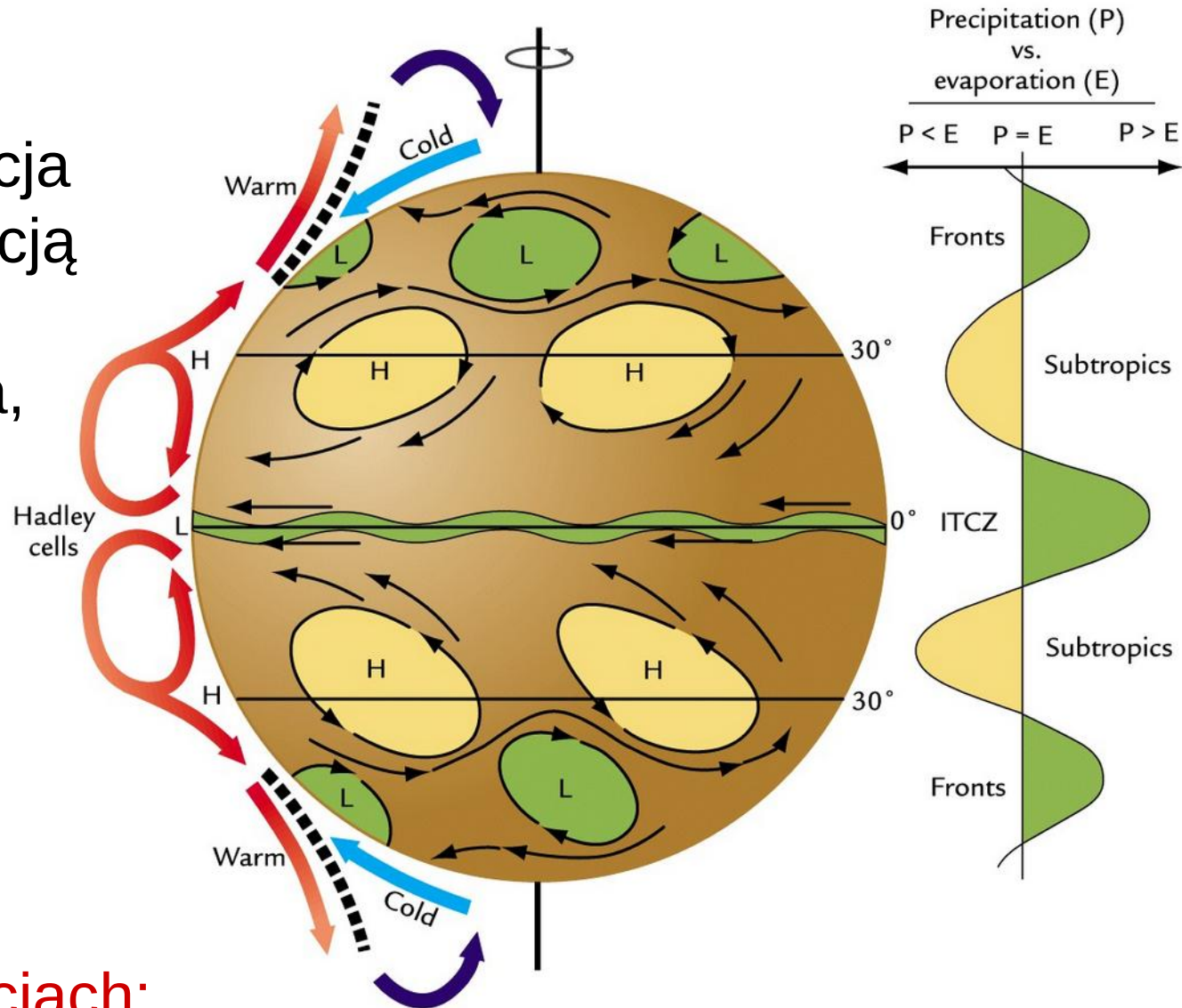
Based on ERBE data. Units are W/m^2

Nierównomierny bilans radiacyjny powoduje przepływy i transport ciepła w atmosferze...

Mechanizmy transportu ciepła od równika do biegunów:

W tropikach:

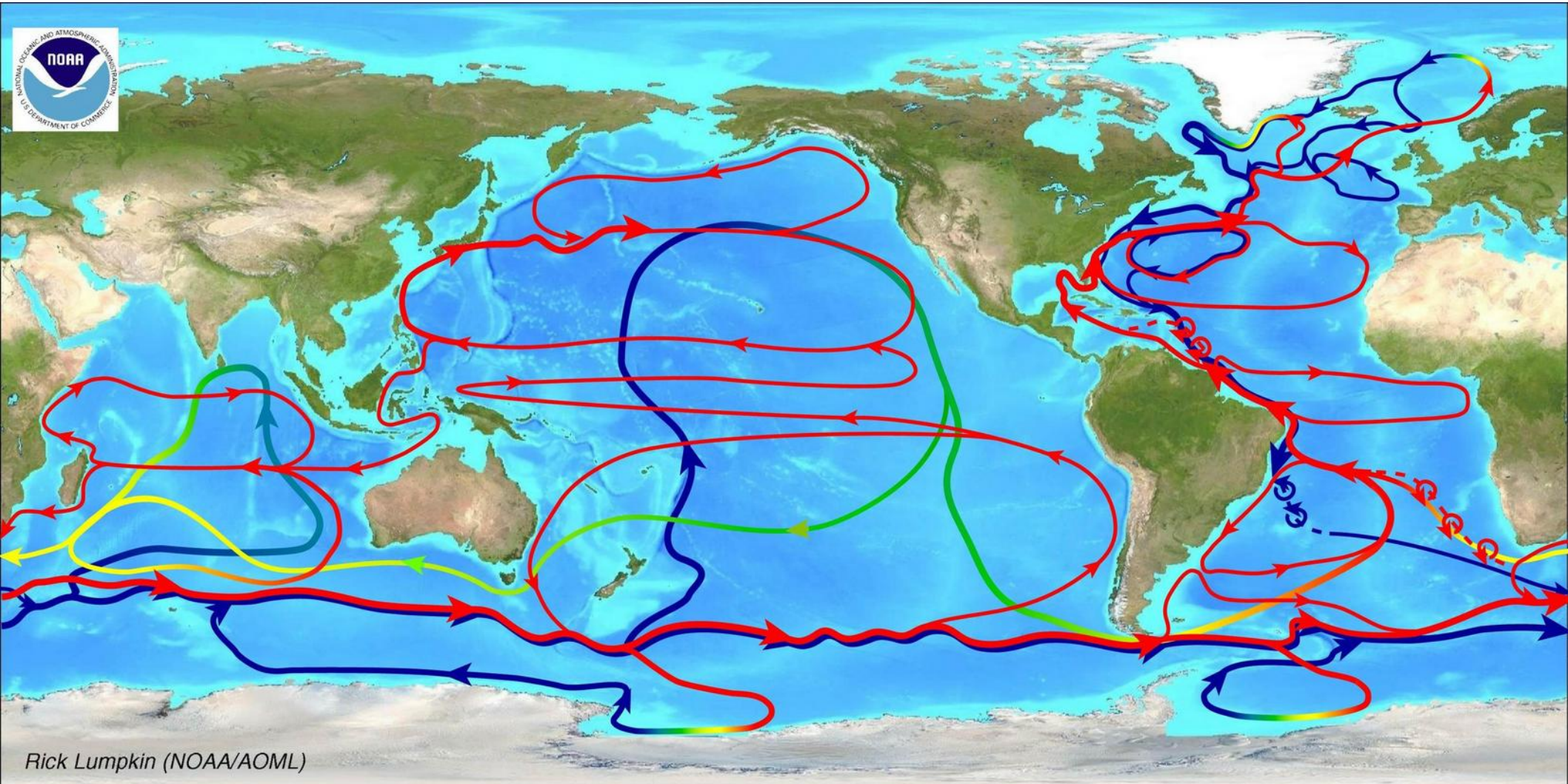
wielkoskalowa cyrkulacja związana z minimalizacją energii potencjalnej, cyrkulacja monsunowa, Komórki Hadleya i Walkera.



W wyższych szerokościach:

Wiry baroklinowe (wyże i niższe i związane z nimi fronty oraz quasi-stacjonarne fale planetarne, na półkuli północnej: Aleutian Low, Siberian High, Icelandic Low.

Schemat cyrkulacji oceanicznej

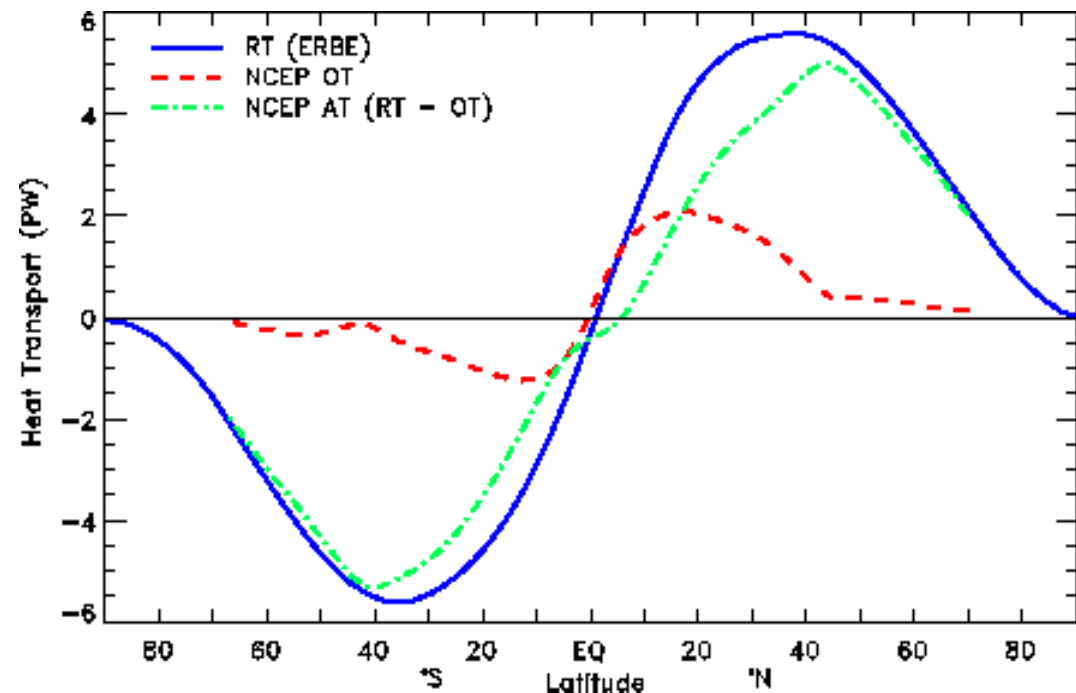


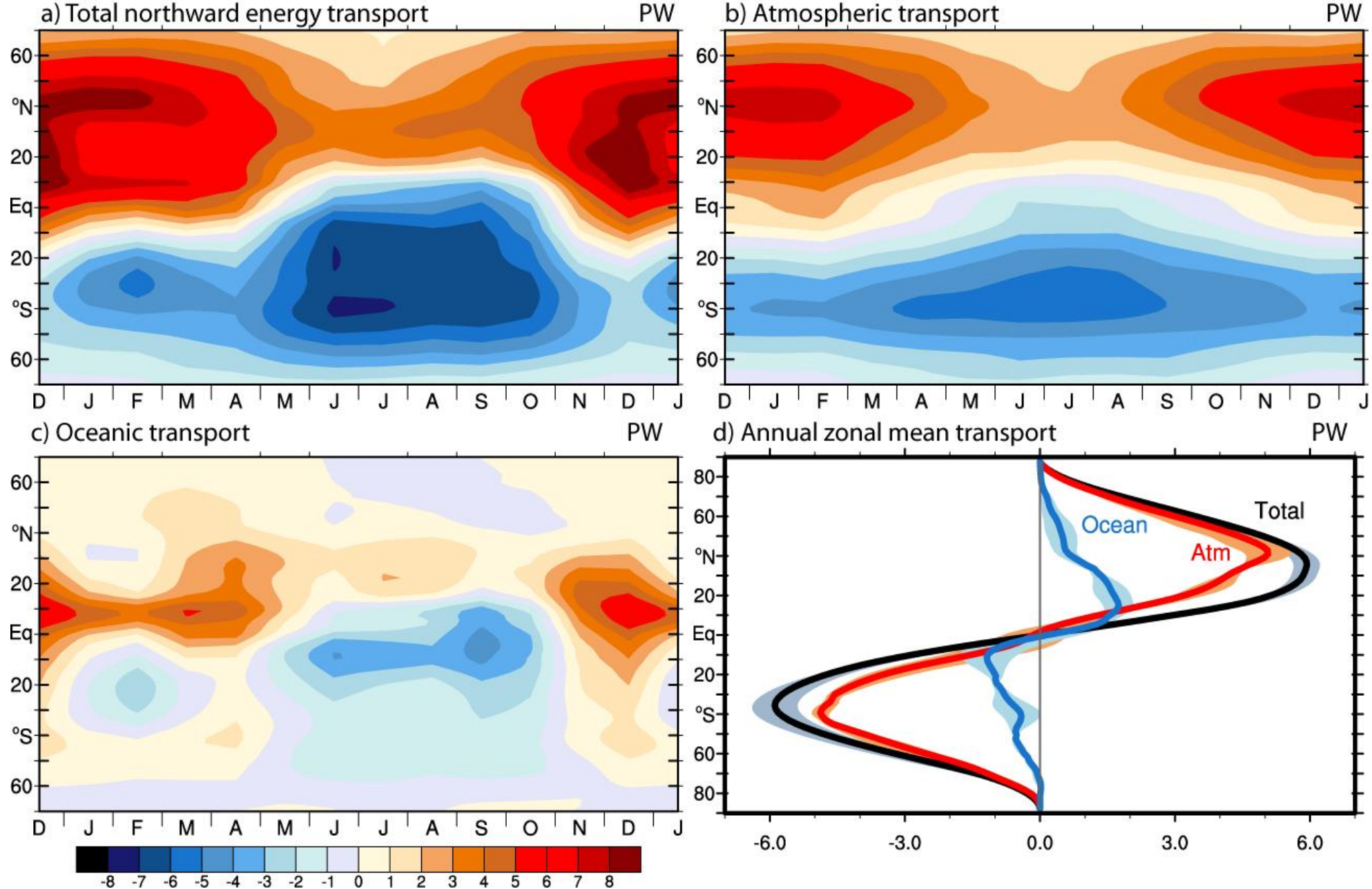
Niebieskie – prądy głębinowe, czerwone – powierzchniowe.

Dzięki REANALIZIE danych meteorologicznych z wykorzystaniem globalnych modeli cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej jesteśmy w stanie zbadać przepływy energii w systemie klimatycznym.

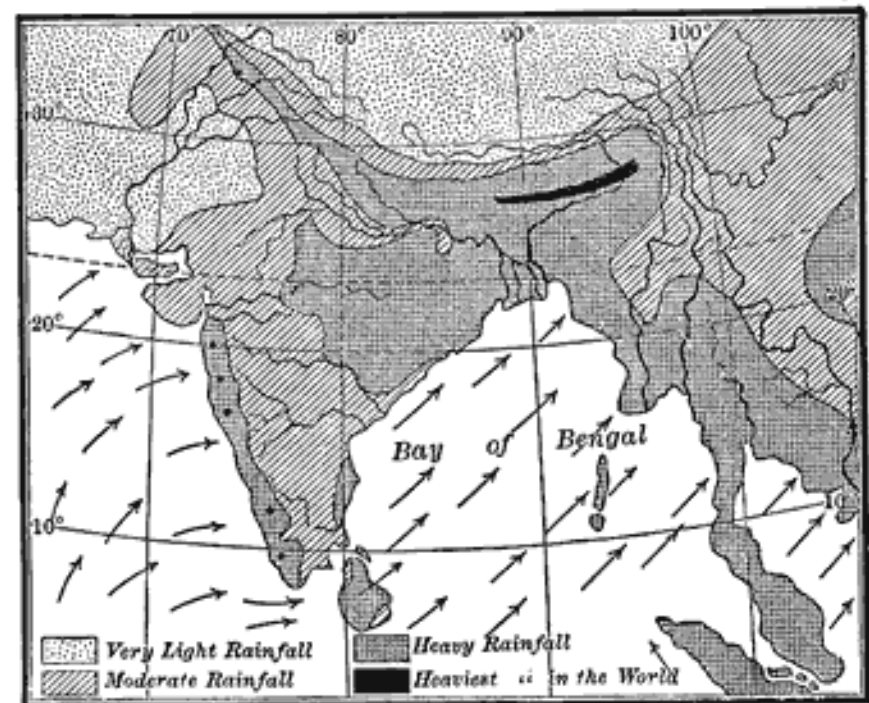
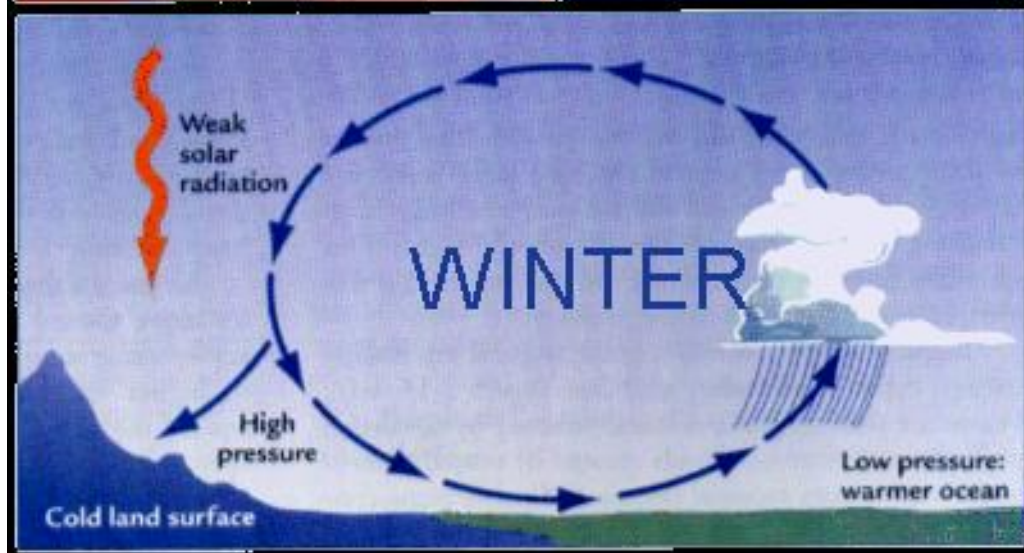
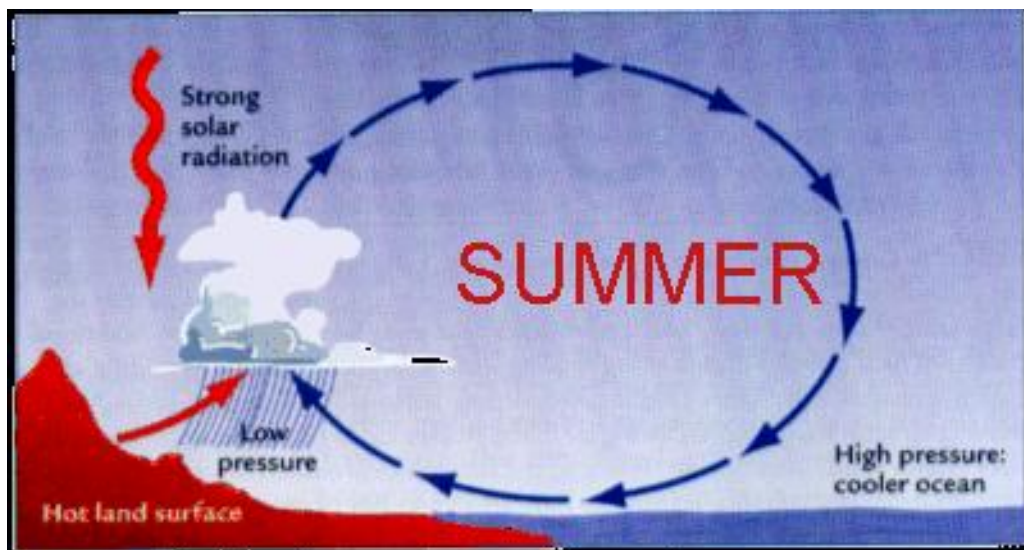
Możemy określić jakie są strumienie transportu ciepła w atmosferze i oceanie i zbadać jak wiąże się to z bilansem radiacyjnym atmosfery w różnych szerokościach geograficznych.

Trenberth and Caron 2001

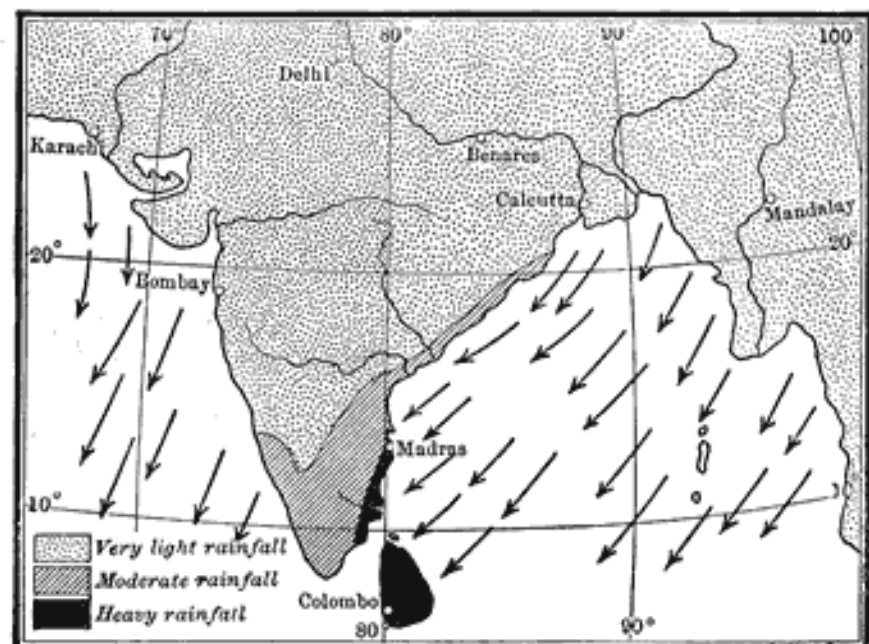




The ERBE period zonal mean annual cycle of the meridional energy transport in PW by (a) the atmosphere and ocean from ERBE products (b) the atmosphere based on NRA; and (c) by the ocean as implied by ERBE + NRA and GODAS. Stippling and hatching in (a)–(c) represent regions and times of year in which the standard deviation of the monthly mean values among estimates, some of which include the CERES period (see text), exceeds 0.5 and 1.0 PW, respectively. (d) The median annual mean transport by latitude for the total (gray), atmosphere (red), and ocean (blue) accompanied with the associated 2 range (shaded). - From Fasullo and Trenberth, 2008b.

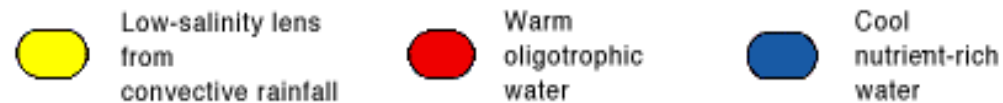
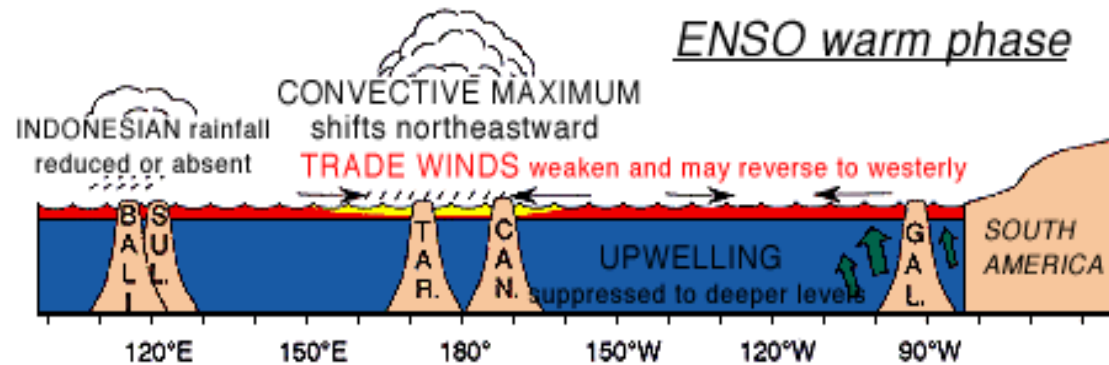
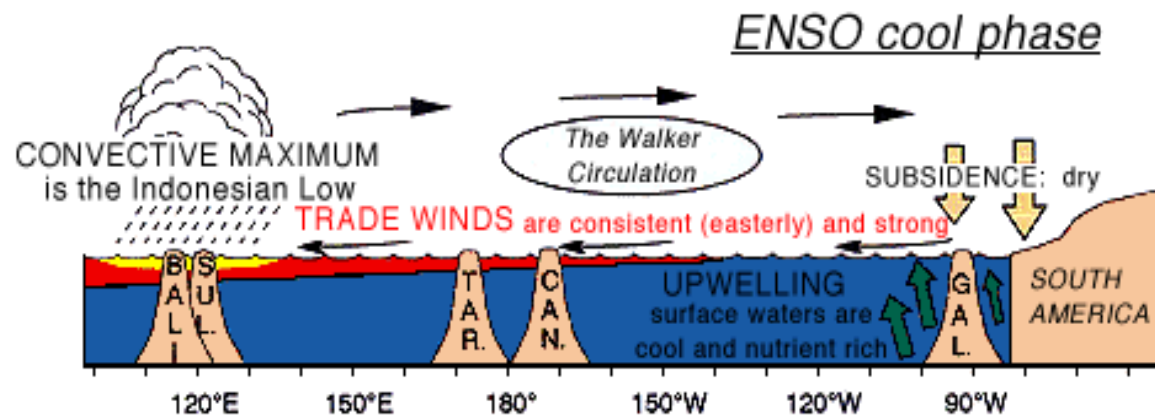
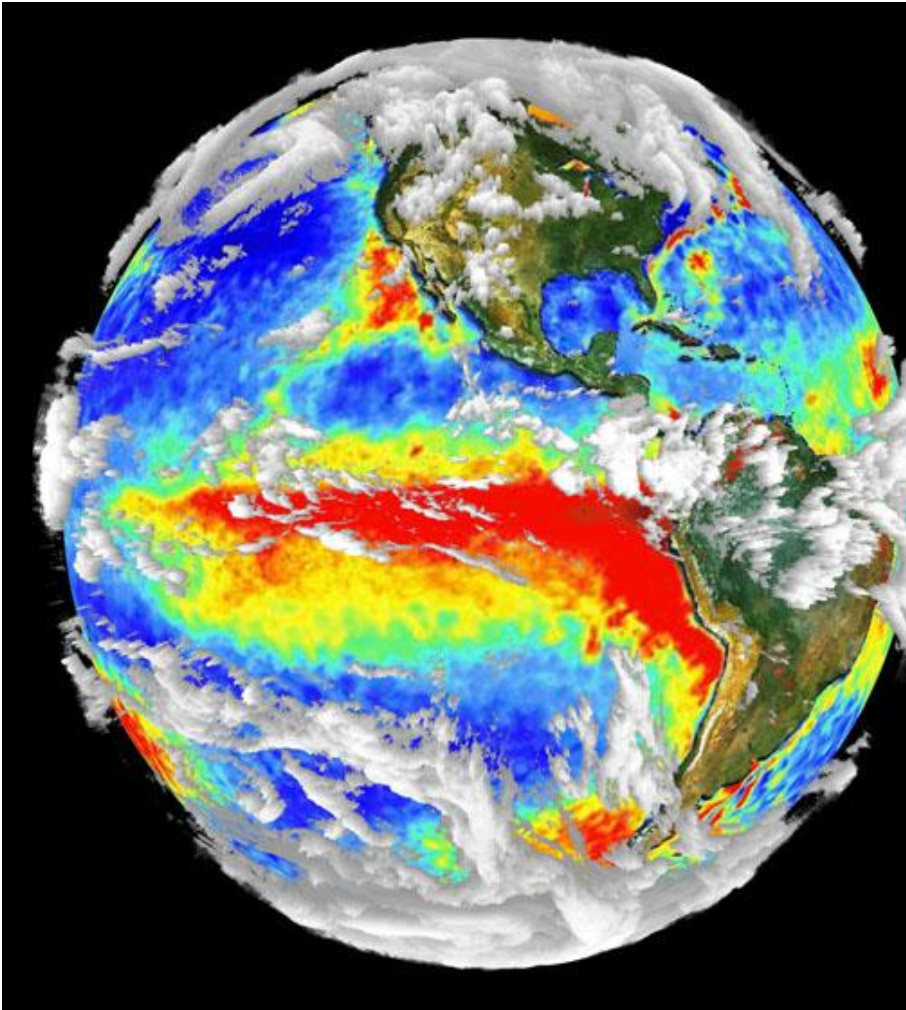


SUMMER MONSOON WINDS

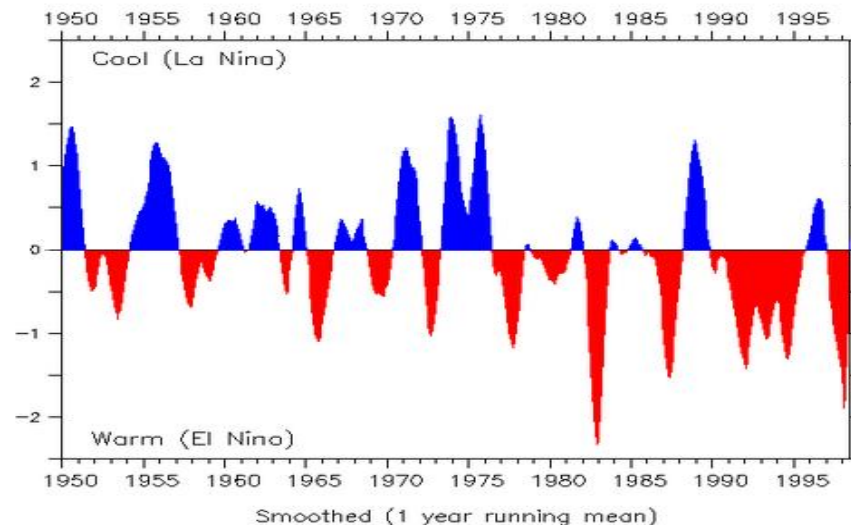


WINTER MONSOON WINDS

Odchylenia od strefowości cyrkulacji globalnej: monsun.



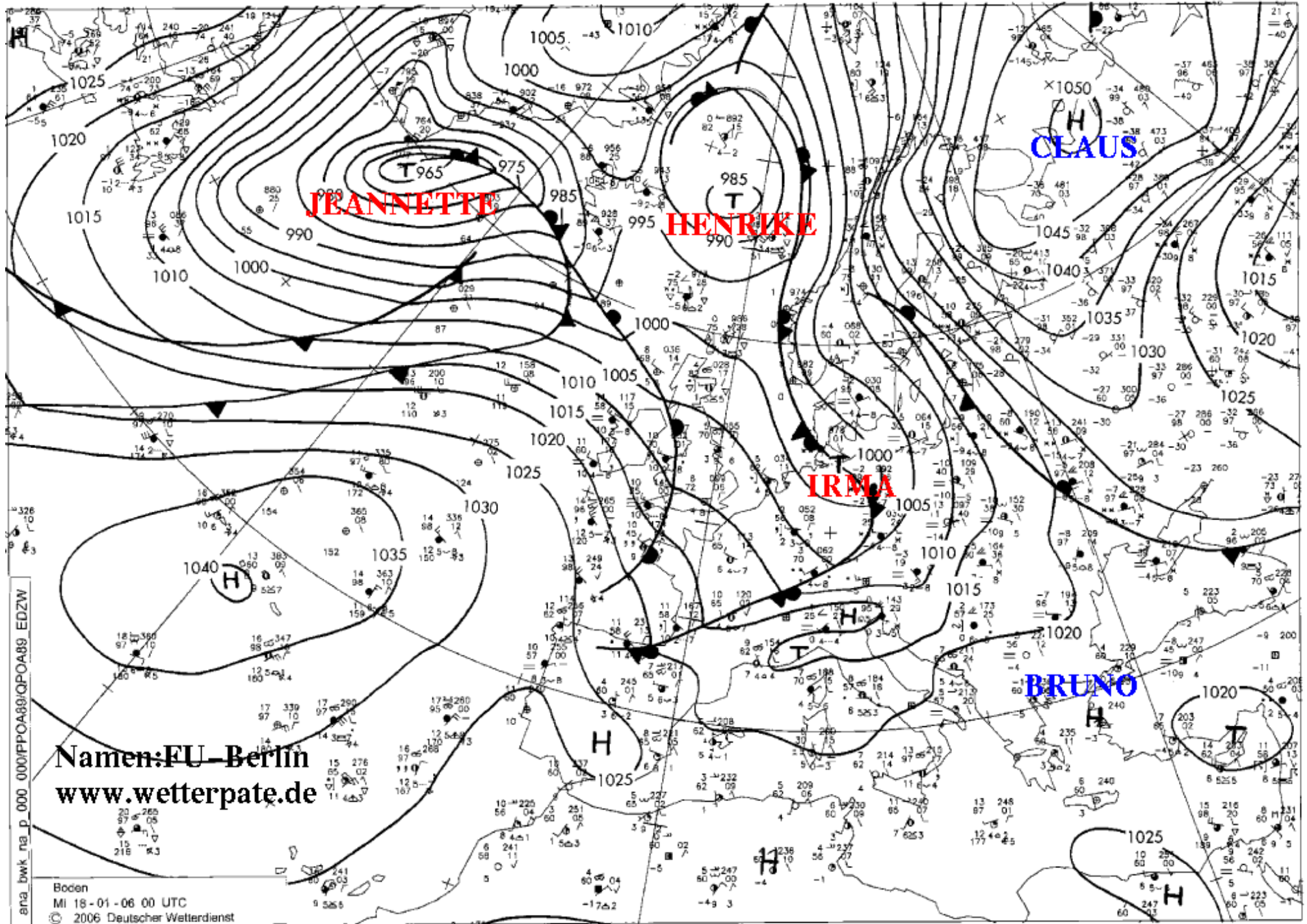
Southern Oscillation Index



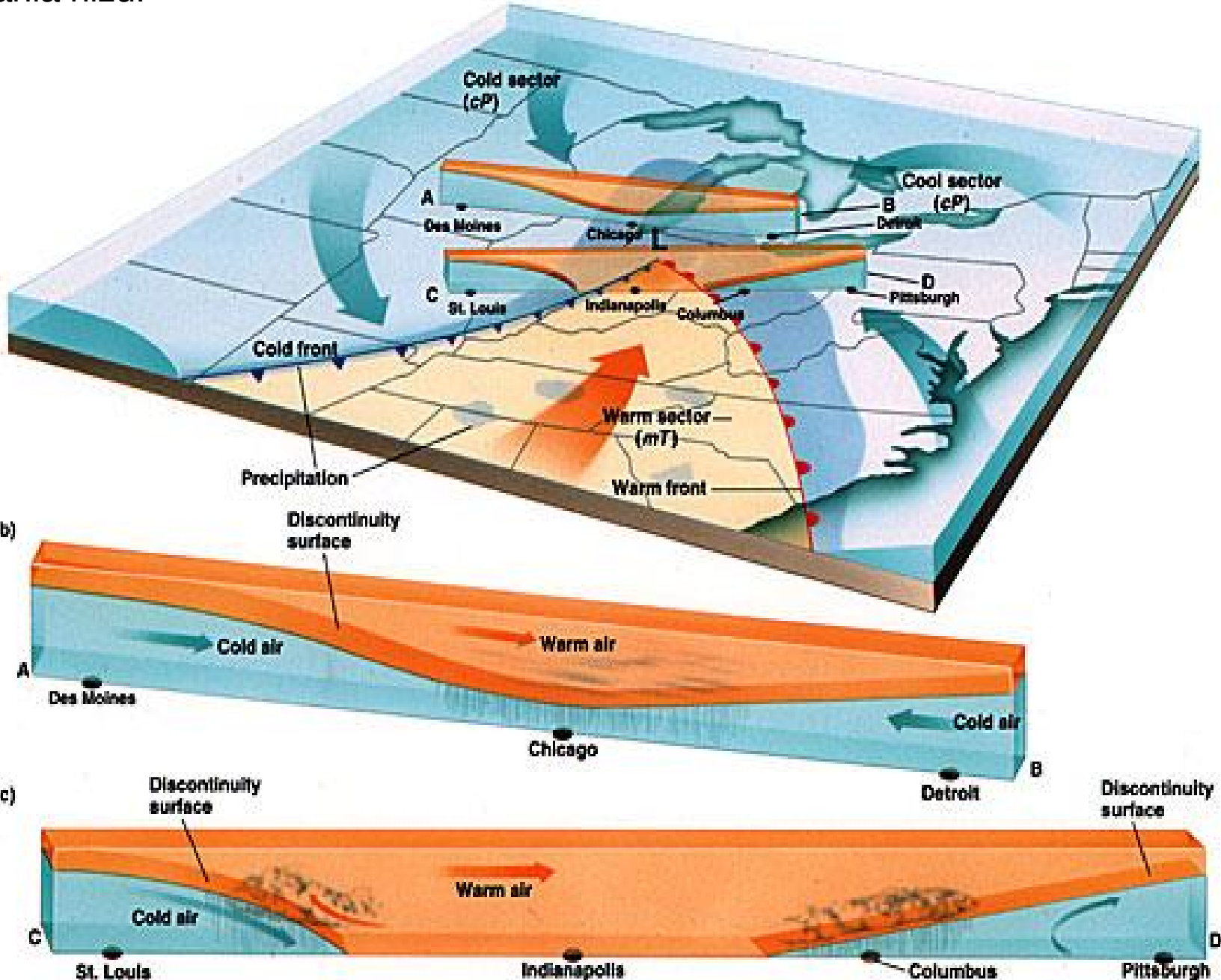
El-Nino, La-Nina, ENSO,
cyrkulacja Walkera – fluktuacje
z roku na rok

Indeks ENSO:
znormalizowana różnica
ciśnienie między Thaiti i Port
Darwin (Australia).

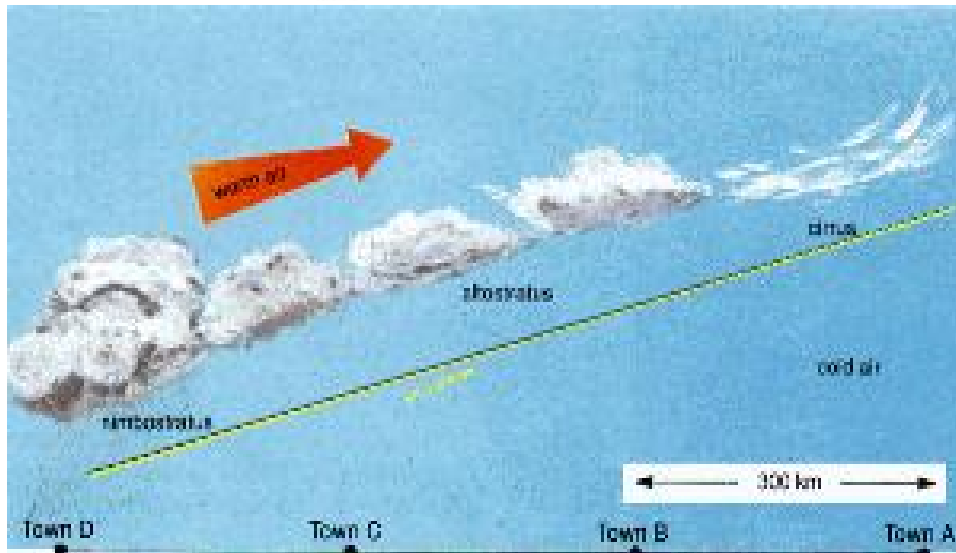
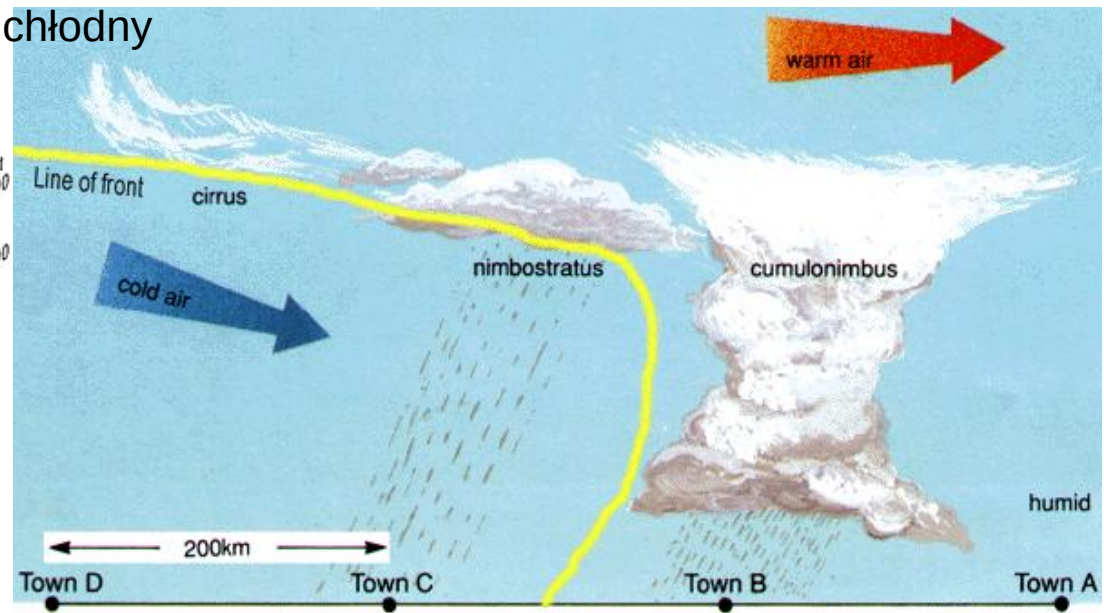
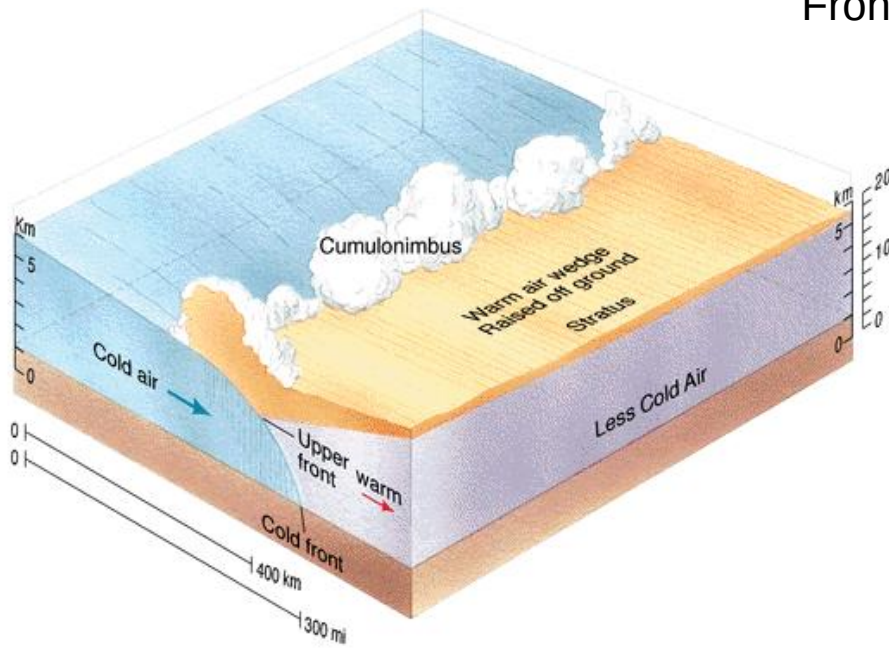
I tak doszliśmy z powrotem do pogody....



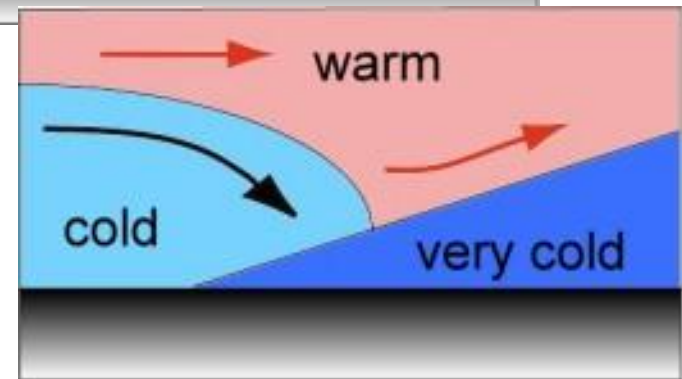
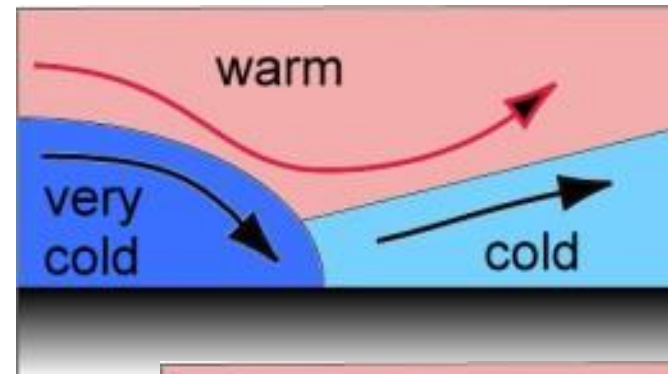
Cyklogeneza – mechanizm powstawania niżu.



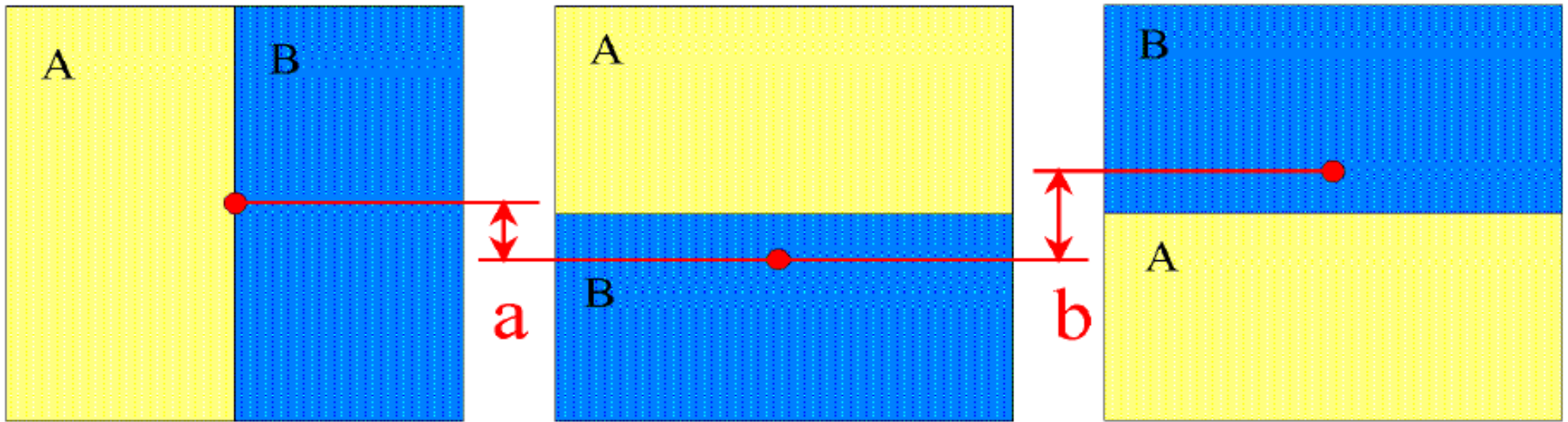
Front chłodny



Front ciepły



Front zokludowany (okluzja)



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.

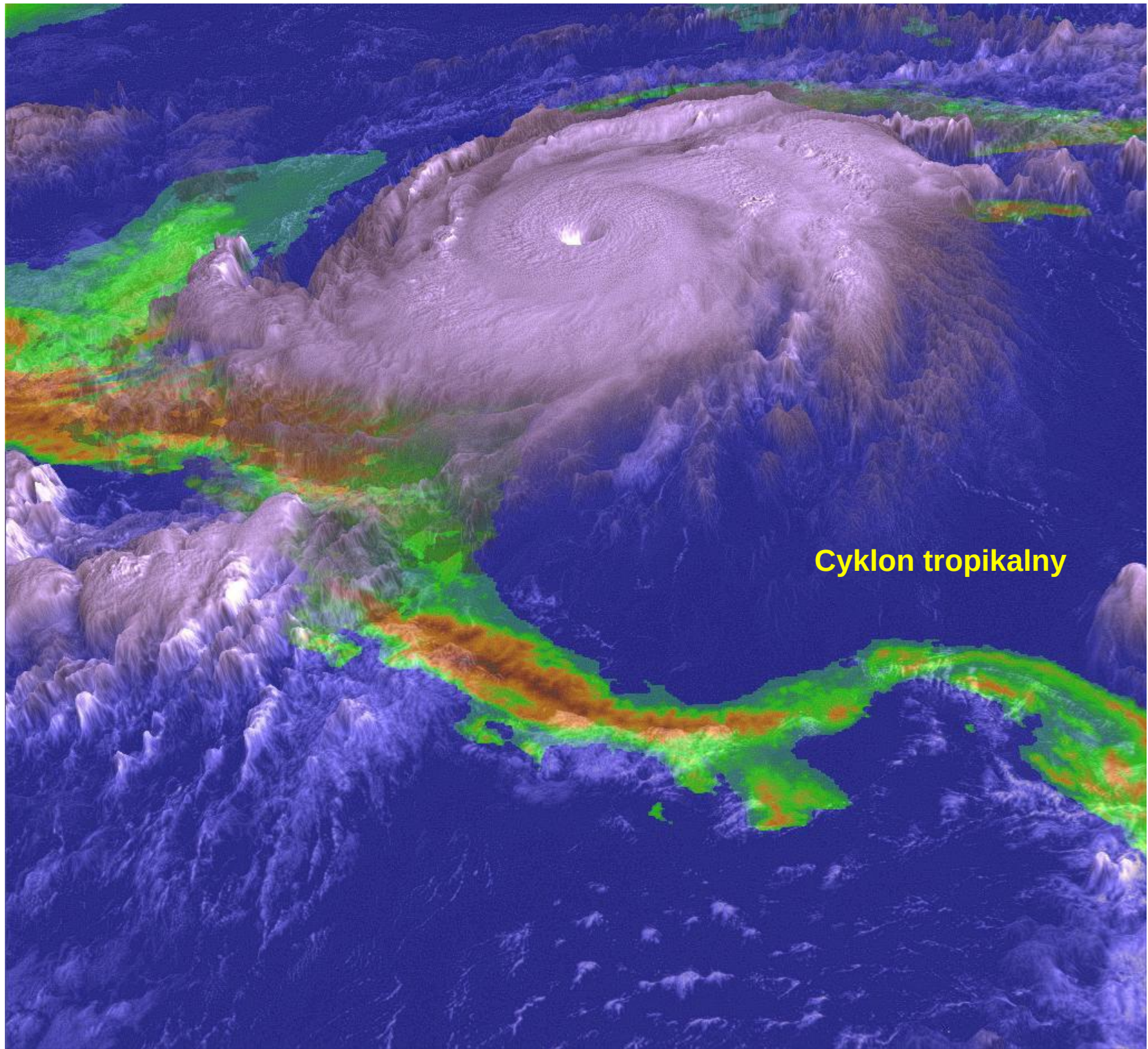
Energia kinetyczna układu uzyskiwana jest z energii potencjalnej przez obniżenie środka ciężkości.

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.



Cyklon tropikalny