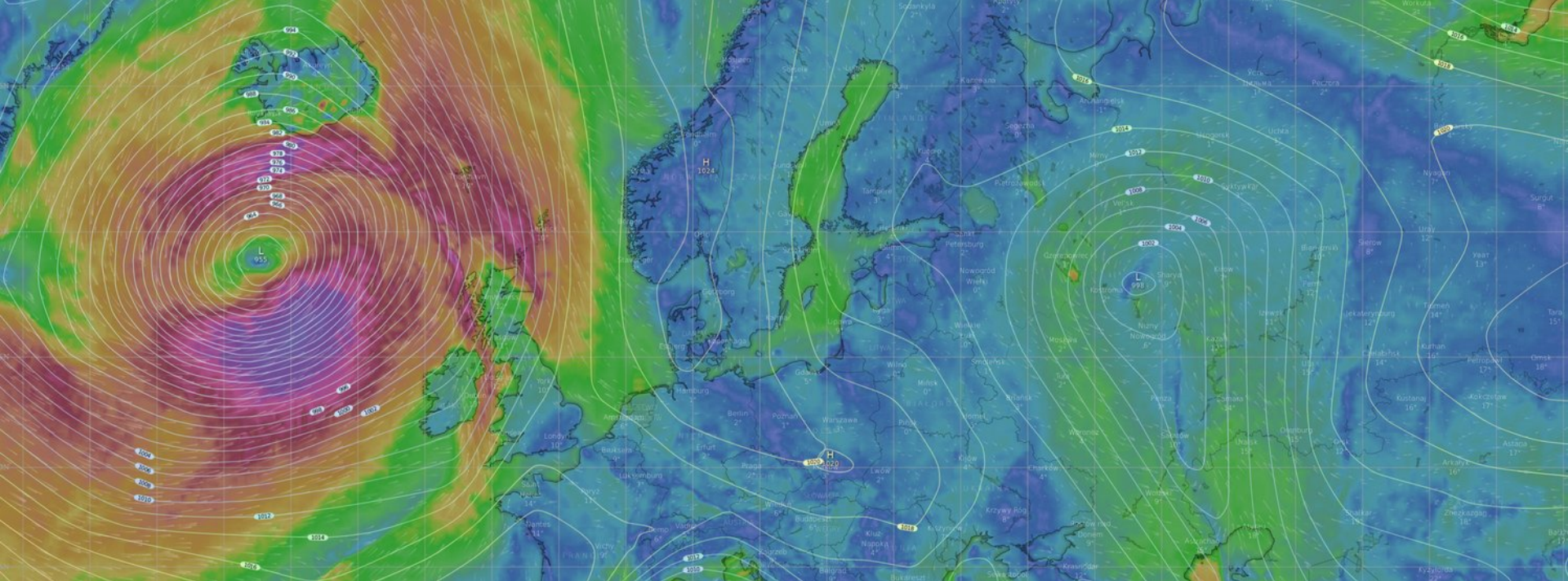




Fizyka Pogody i Klimatu

Wykład 1

Szymon Malinowski, Krzysztof Markowicz
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

Uwagi ogólne

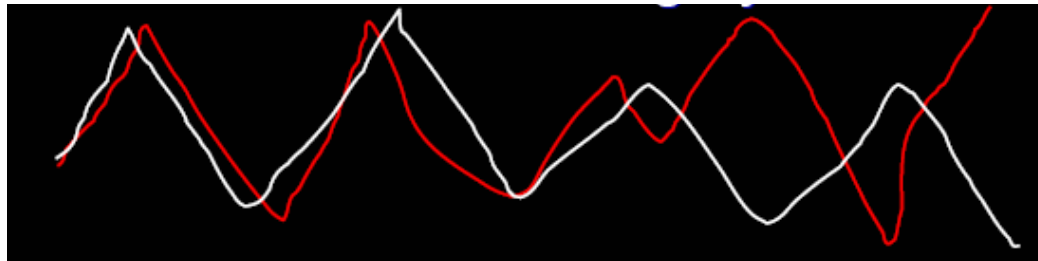
- Kod przedmiotu:1100-2`FPK,3 ECTS, 30 h
- Prowadzący:
Szymon Malinowski, Krzysztof Markowicz
- Termin: semestr zimowy, poniedziałek, godz. 13.15
- Zajęcia stacjonarne (ewentualnie platforma Zoom)
- Forma zaliczenia: egzamin pisemny.

Literatura

- G. W. Petty, A First Course in Atmospheric Radiation.
- G. L. Stephens, Remote Sensing of the Lower Atmosphere. An Introduction.
- J.R. Holton, An Introduction to dynamic meteorology.
- M. L. Salby, Fundamentals of Atmospheric Sciences.
- M. Popkiewicz, A. Kardaś, Sz. Malinowski, Nauka o Klimacie (II rozdział)

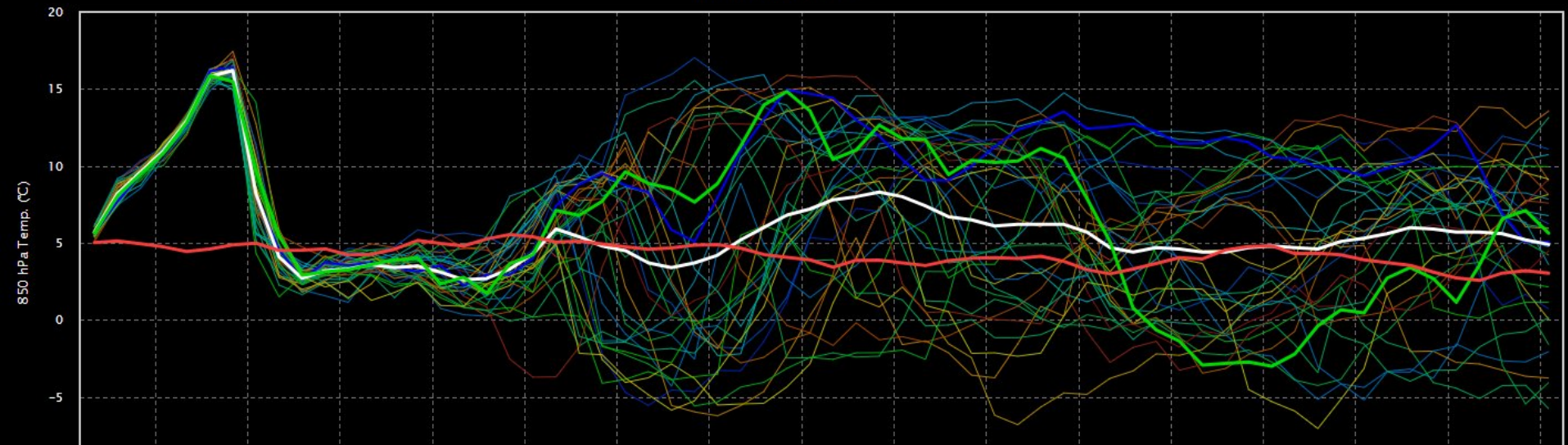
Deterministyczny i stochastyczny opis zjawisk meteorologicznych.

- Atmosfera wraz z hydrosferą stanowią układ dynamiczny opisywany przez nieliniowe równania różniczkowe.
- Okazuje się, że niewielkie zaburzenie warunków początkowych powoduje rosnące wykładniczo z czasem zmiany w zachowaniu układu. Popularnie nazywane jest to **efektem motyla** - znikoma różnica na jakimś etapie może po dłuższym czasie urosnąć do dowolnie dużych rozmiarów.
- Powoduje to mimo, że model jest deterministyczny, w dłuższej skali czasowej wydaje się zachowywać w sposób losowy.



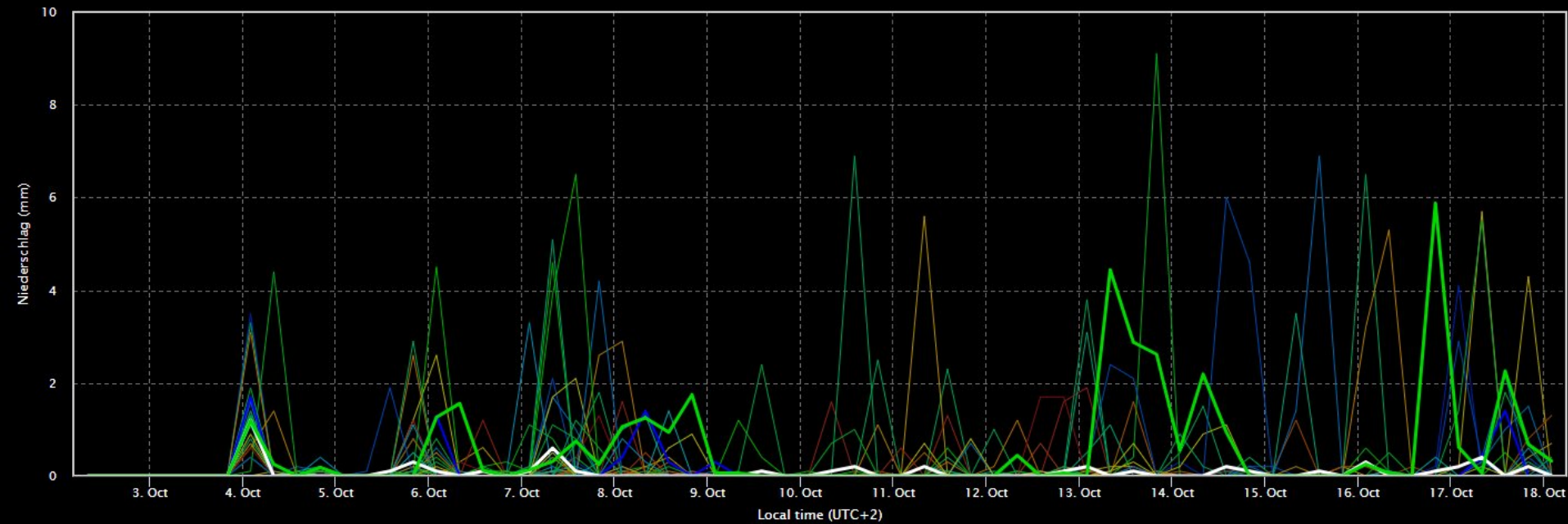
GFS Warsaw (PL) 52N, 21E

Init: Mon, 02Oct2023 00Z



GFS Warsaw (PL) 52N, 21E

Init: Mon, 02Oct2023 00Z



P01 P02 P03 P04 P05 P06 P07 P08 P09 P10 P11 P12 P13 P14 P15 P16 P17 P18 P19 P20 P21
P22 P23 P24 P25 P26 P27 P28 P29 P30 CONTROL AVG OPER

Edward Lorenz a determinizm zjawisk atmosferycznych

- W roku 1960 Edward Lorenz pracował nad komputerowym prognozowaniem pogody. Stworzył do tego celu układ 12 równań wyrażających relacje między temperaturą, ciśnieniem, prędkością wiatru itd. Sądził, jak większość ówczesnych naukowców, że prawie dokładne dane wejściowe, dają prawie dokładne wyliczenia. To przekonanie okazało się jednak błędne.
- Kiedy Lorenz wprowadził do komputera dwie liczby wejściowe - najpierw 0.506127, a później 0.506 - otrzymał w rezultacie dwa coraz bardziej różniące się od siebie, w miarę upływu symulowanego czasu, wykresy. Różnica na wejściu programu rzędu 10^{-4} okazała się bardzo znacząca na wyjściu. Takie zachowanie jakiegoś układu nazywa się wrażliwością na warunki początkowe lub efektem motyla. Dlatego też niemożliwe jest prawidłowe prognozowanie pogody na więcej niż kilka (kilkanaście) kolejnych dni. Nigdy nie znamy przecież chwilowych warunków pogodowych na tyle dokładnie, aby błąd w długookresowych obliczeniach był niezauważalny.

Przewidywalność zjawisk

- Aby móc przewidywać należy znać:
 - ogólne prawa ruchu
 - działające siły
 - warunki początkowe (lub brzegowe)(pędy i położenia składników w pewnej chwili t_0)
- Warunki początkowe znamy zawsze ze skończoną dokładnością (pomiar).
- Liniowość równań mechaniki klasycznej – dokładność przewidywań jest wprost proporcjonalna do dokładności pomiarów.

Determinizm w mechanice klasycznej

- Determinizm = stan układu w pewnej chwili początkowej t_0 jednoznacznie wyznacza stan układu w dowolnej chwili t .

$$m \frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2} = \vec{F}$$

- Stan układu (izolowanego) określony jest przez położenia r i pędy p wszystkich jego składników w chwili t .
- Dynamikę układu opisują liniowe równania różniczkowe Newtona.
- Równania liniowe mają jednoznaczne rozwiązania.

Prawa deterministyczne a prawa statystyczne

- W większości przypadków dedukcja zachowania układów złożonych ze znajomości elementarnych procesów mechanicznych okazała się efektywnie niewykonalna – w fizyce zastosowano prawa statystyczne (kinetyczna teoria gazów), które ustalają przebieg zjawisk w skali makroskopowej i nie muszą być spełnione w każdym pojedynczym przypadku.
- Przyjmowano, że prawa statystyczne mają status praw wtórnych (każda cząsteczka gazu porusza się zgodnie z deterministycznymi równaniami Newtona, które mają charakter praw podstawowych).
- Zagadnienie trzech ciał na gruncie mechaniki klasycznej nie ma ścisłego rozwiązania i trzeba szukać rozwiązań przybliżonych.

- Prawa deterministyczne i stochastyczne odgrywają we współczesnej fizyce równie ważną rolę i nie widać powodu (ani możliwości) redukowania jednych do drugich.
- W pewnych przypadkach można przewidywać zjawiska niemal z całkowitą pewnością, w innych musimy się zadowolić znajomością prawdopodobieństwa.

Np.:

- prognoza wystąpienia burzy konkretnego dnia na danym obszarze,
- prognoza porywów wiatrów przekraczających 100 km/h

Czy możemy przewidywać zmiany klimatyczne gdy nie potrafimy przewidzieć pogody na kilka tygodni ?

- Modele klimatu mają bardzo podobną strukturę do modeli prognozujących pogodę na kuli ziemskiej, ale są od nich mimo wszystko różne.
- W prognozie pogody symulacje są dosyć krótkie - maksymalnie kilka dni. Modele prognozy pogody wymagają bardzo precyzyjnych danych początkowych - zazwyczaj obserwacji ze stacji synoptycznych połączonych z asymilacją danych.
- Modele prognozy są robione zazwyczaj na znacznie gęstszej siatce
- Mimo, że prognozy numeryczne pogody po kilku dniach tracą dokładność to nie znaczy, że symulacje klimatu są niedokładne. Dzieje się tak dlatego, ponieważ w problemie klimatu istotne są wartości statystyczne (średnie, trendy itd.).

- Różnice pomiędzy modelem klimatu a modelem prognoz pogody widoczne są na przykładzie ćmy poruszającej się w pokoju w którym jednym źródłem światła jest żarówka przy suficie. Nie jesteśmy w stanie przewidzieć położenia ćmy po kilku sekundach za to możemy powiedzieć jakie jest jej średnie położenie nawet po godzinie...

Pogoda i klimat.

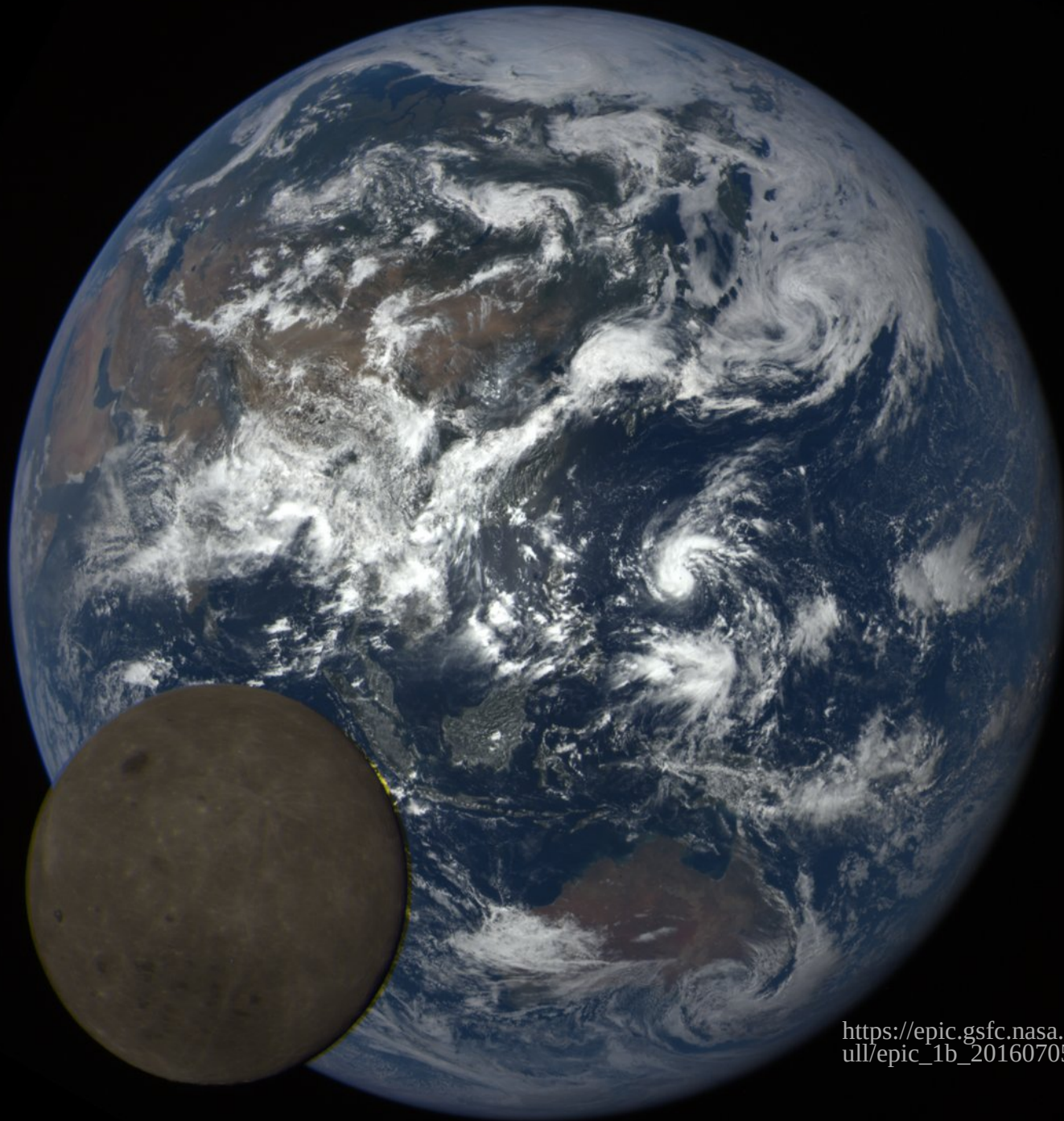
- **Pogoda** – chwilowy stan atmosfery opisywany przez wielkości fizyczne takie jak: temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, wilgotność, natężenie promieniowania słonecznego, prędkość i kierunek wiatru, zachmurzenie i rodzaj chmur, opady itd.
- **Klimat** (def. geograficzna) – charakterystycznych dla danego obszaru przebieg warunków atmosferycznych określony na podstawie minimum 30-sto letnich obserwacji.

Klimat, definicja fizyczna

- Klimat to pojęcie statystyczne i bardziej złożone. Zdefiniowany jest przez pojęcia statystyczne a nie tylko przez wartości średnie. Wielkościami tymi są:
wariancja (miara odchylenia od wartości średniej)
odchylenie szandarowe
kwantyle (np. prawdopodobieństwo, że średnia temperatura stycznia 2023 roku będzie niższa niż -4C)
prawdopodobieństwo
Ostatnia wielkość określa np. jakie jest prawdopodobieństwo że średnia temperatura lutego 2023 roku będzie w przedziale od -3 do -4 C.

Klimat – pojęcie szersze

- Klimat to ogół warunków panujących na powierzchni planety.



Ten sam
strumień energii
od gwiazdy na
jednostkę
powierzchni.

Dwa różne
systemy
klimatyczne,
dwa różne
klimaty.

https://epic.gsfc.nasa.gov/epic-galleries/2016/lunar_transit/full/epic_1b_20160705044720_01.png

Anomalie

- Czyli odchylenie od wartości średniej (przeciętej)
- Pojęcie stosowane często w klimatologii do analizy zmienności warunków pogodowych.

Czy anomalie pogodowe świadczą o zmianach klimatu

- Nie, gdyż anomalie są naturalnie związane z klimatem.
- Dopiero gdy anomalia utrzymuje się przez odpowiedni długi okres czasu (30 lat) może to świadczyć o zmianach klimatycznych.

Anomalie c.d.

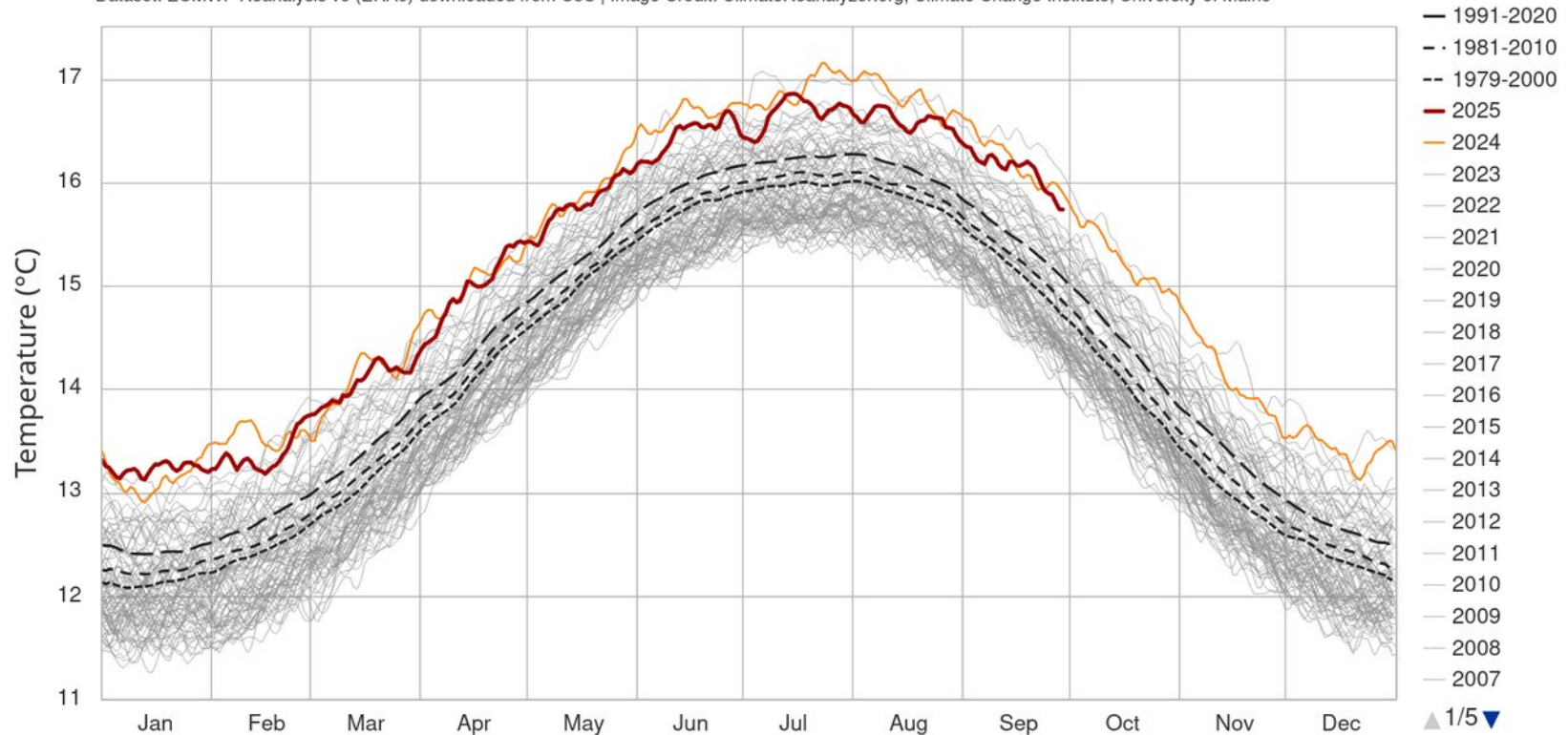
- Czy chłodne lato jakiegoś roku może dowodzić, że nie mamy do czynienia z globalnym ociepleniem?
- Czy śnieżna i mroźna zima jakiegoś roku może być dowodem na brak globalnego ocieplenia?

Rok 2025 na tle ostatnich lat

Daily Surface Air Temperature, World (90°S–90°N, 0–360°E)

[Export Chart](#)

Dataset: ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) downloaded from C3S | Image Credit: ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine



Show T2 Anomaly Map

Hide Selected Area

Hide 1940-1990

Hide 1991-2025

Hide Legend

ERA5 2m Temperature (°C)
Mon, Sep 29, 2025 | 1-day Avg

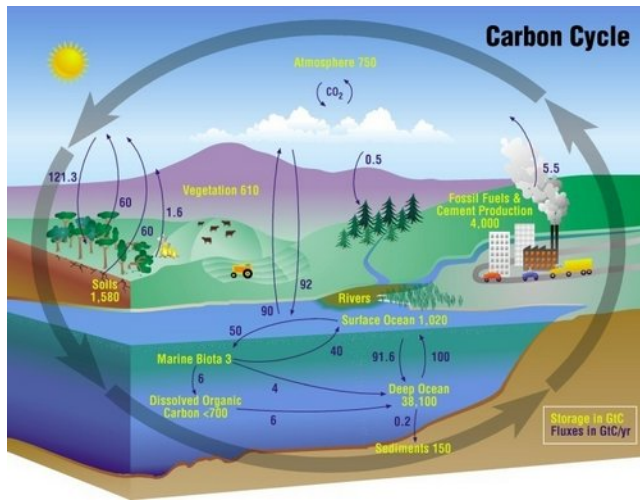
ClimateReanalyzer.org
Climate Change Institute | University of Maine

System klimatyczny

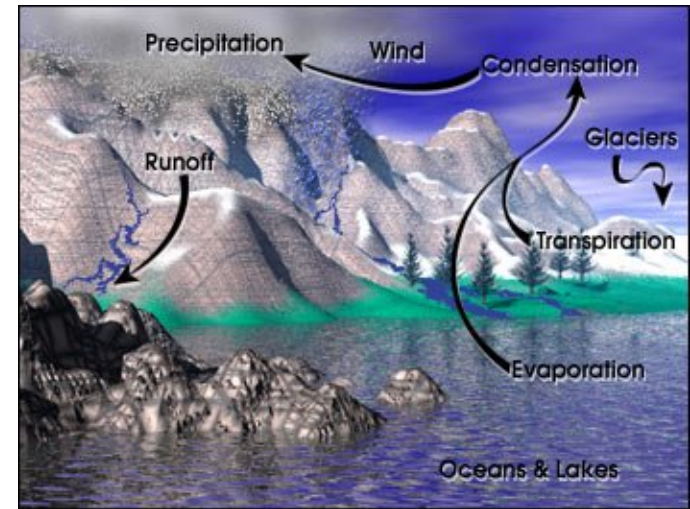
- **System klimatyczny** to złożony układ składający się z pięciu elementów: atmosfera, hydrosfera, kriosfera, biosfera i powierzchnia ziemi w którym zachodzą interakcje między nimi.
- System klimatyczny jest pod wpływem wewnętrznej dynamiki oraz zewnętrznych zaburzeń (np. aktywność Słońca).
- **Procesy klimatyczne** - to procesy fizyczne zachodzące w systemie klimatycznym prowadzące do zmian klimatu. Najczęściej zalicza się do nich obieg energii, cykl hydrologiczny oraz cyrkulację powietrza. Determinują one zarówno naturalne i antropogeniczne zmiany w systemie klimatycznym.

Składniki systemu klimatycznego

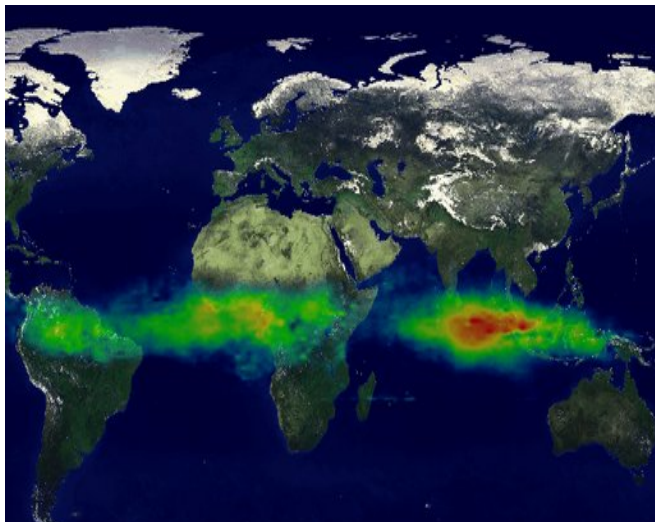
Obieg węgla



Obieg wody i energii

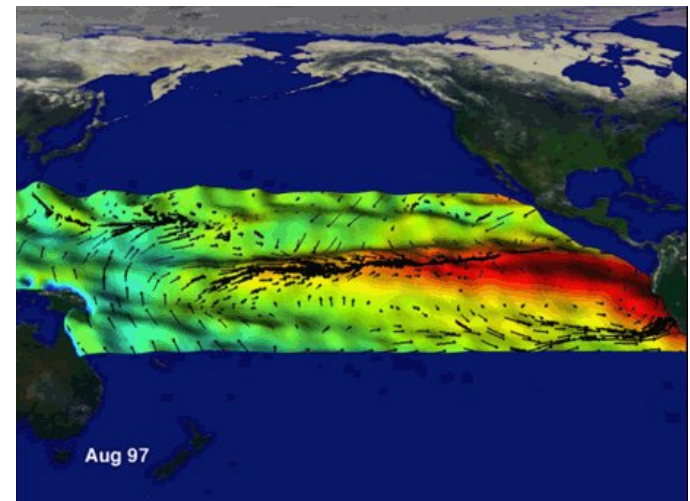


Reakcje chemiczne w atmosferze



połączenie chaotyczne nieliniowe

Dynamika atmosfery i oceanu

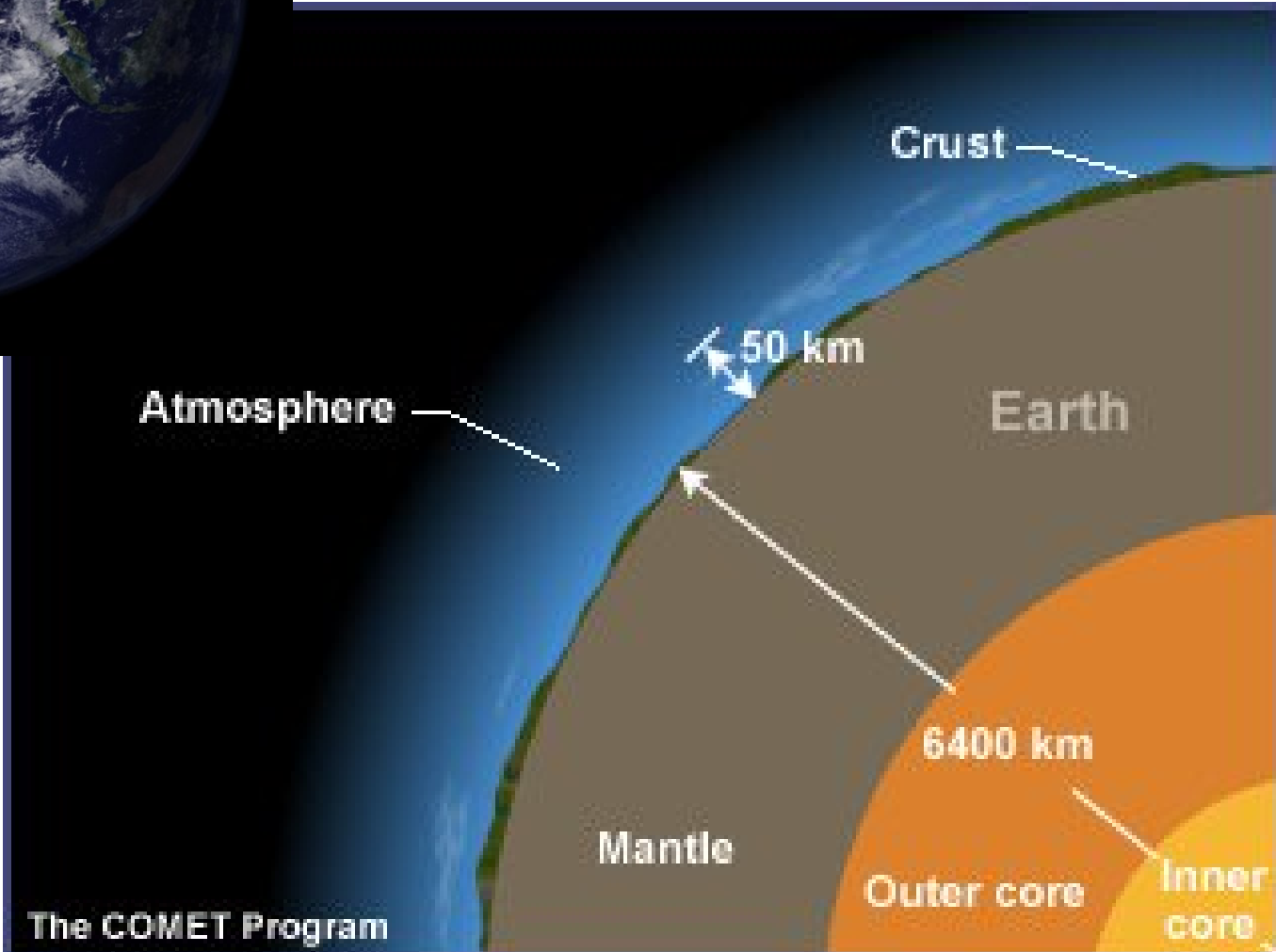




Atmosfera ziemiska

Czy możemy dostrzec atmosferę z kosmosu?

- bezpośrednio (cienka warstwa otaczająca kulę ziemską)
- pośrednio (chmury)



1 km



6 km



13 km



21 km



Widok z wysokości około 30 km

słabe rozpraszanie
promieniowania

intensywne rozpraszanie
promieniowania

atmosfera



Atmosfera c.d.

- Masę atmosfery $5.3 \cdot 10^{15}$ t.
- Połowa całej masy atmosfery mieści się w warstwie od powierzchni Ziemi do 5.5 km
- 75% - do 10,5 km
- 90% - do 20 km
- 99% - do 35 km.
- Gdyby sprężyć całą atmosferę do gęstości panującej przy powierzchni ziemi wówczas jej grubość wynosiłaby około 7.8 km.
- Gdyby całą atmosferę sprężyć do gęstości wody jej grubość wyniosłaby 10m.

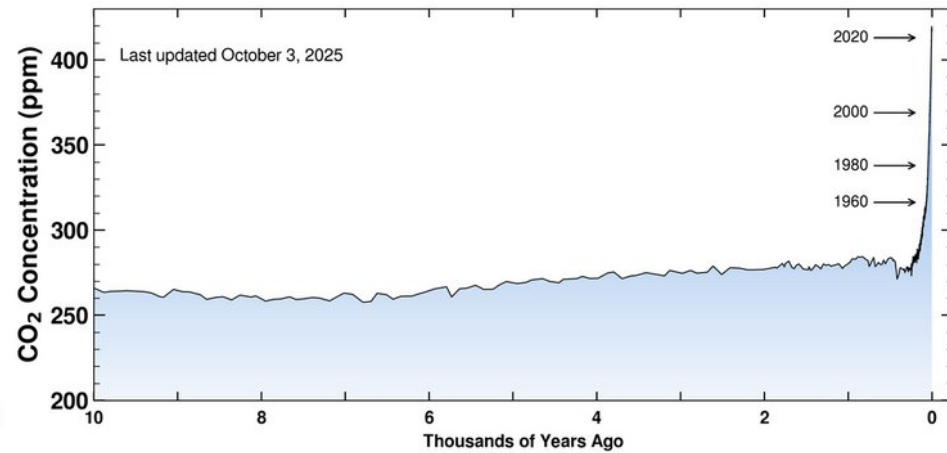
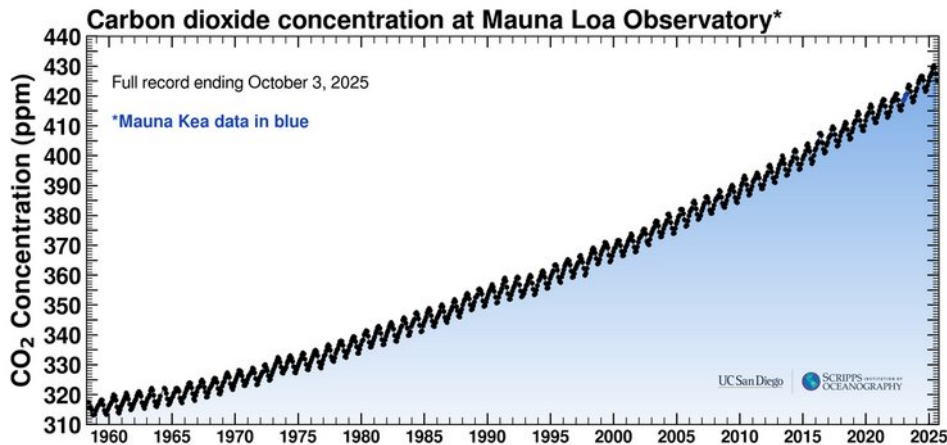
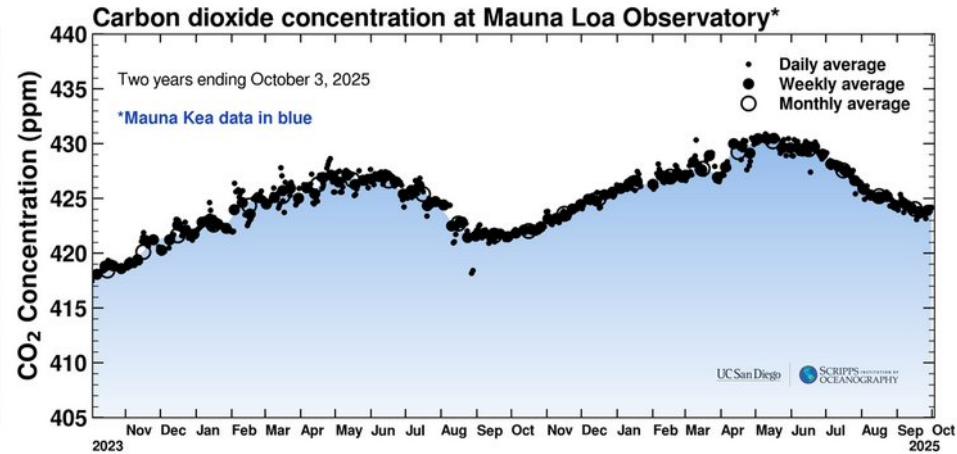
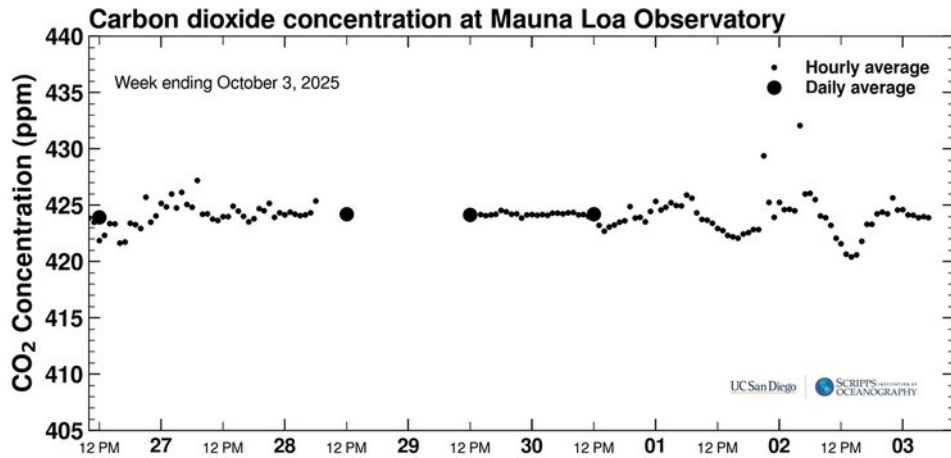
Skład powietrza suchego

* ppm — liczba molekuł danej substancji przypadających na milion molekuł mieszaniny

** ppb — liczba molekuł danej substancji przypadających na miliard molekuł mieszaniny

Składnik	Koncentracja	Przeciętny czas przebywania w atmosferze
Składniki trwałe		
azot · N ₂	78,09%	dziesiątki milionów lat
tlen · O ₂	20,95%	dziesiątki milionów lat
argon · Ar	0,93%	dziesiątki milionów lat
gazy szlachetne: hel · He, neon · Ne, krypton · Kr, ksenon · Xe	24 ppm*	dziesiątki milionów lat
Składniki wolnozmienne		
dwutlenek węgla · CO ₂	ok. 420 ppm i rośnie	~1000 lat i więcej
metan · CH ₄	1,9 ppm i rośnie	kilka lat
wodór · H ₂	0,5 ppm i rośnie	dni i tygodnie
podtlenek azotu · N ₂ O	0,33 ppm i rośnie	
Składniki zmienne		
ozon · O ₃	do 10 ppm w stratosferze, 5–50 ppb w powietrzu czystym, do 500 ppb w powietrzu zanieczyszczonym przy gruncie	
tlenki azotu · NO _x	od 0–100 ppb w powietrzu zanieczyszczonym	kilka dni
amoniak · NH ₃	6 ppb nad lądem	1–4 dni
związki siarki · (H ₂ S, SO, SO ₂)	do kilku ppb w powietrzu zanieczyszczonym	kilka dni

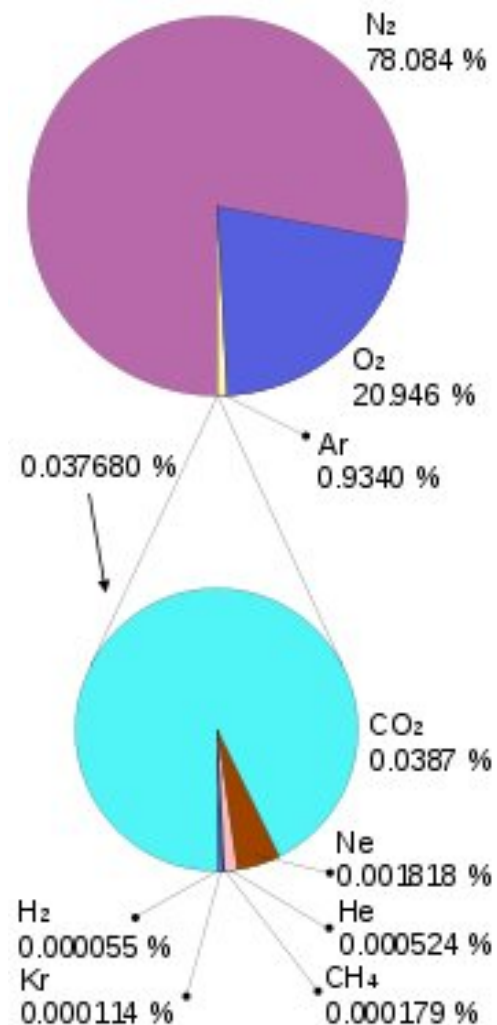
Zmiany czasowe koncentracji dwutlenku węgla



<https://keelingcurve.ucsd.edu/>

Skład atmosfery gazy stałe

Gaz	Symbol	% objętości	Dlaczego ważny?
Azot	N ₂	78,09	biosfera
Tlen	O ₂	20.95	Pochłanianie UV, oddychanie
Argon	Ar	0,93	Gaz nieaktywny, właściwie nieistotny

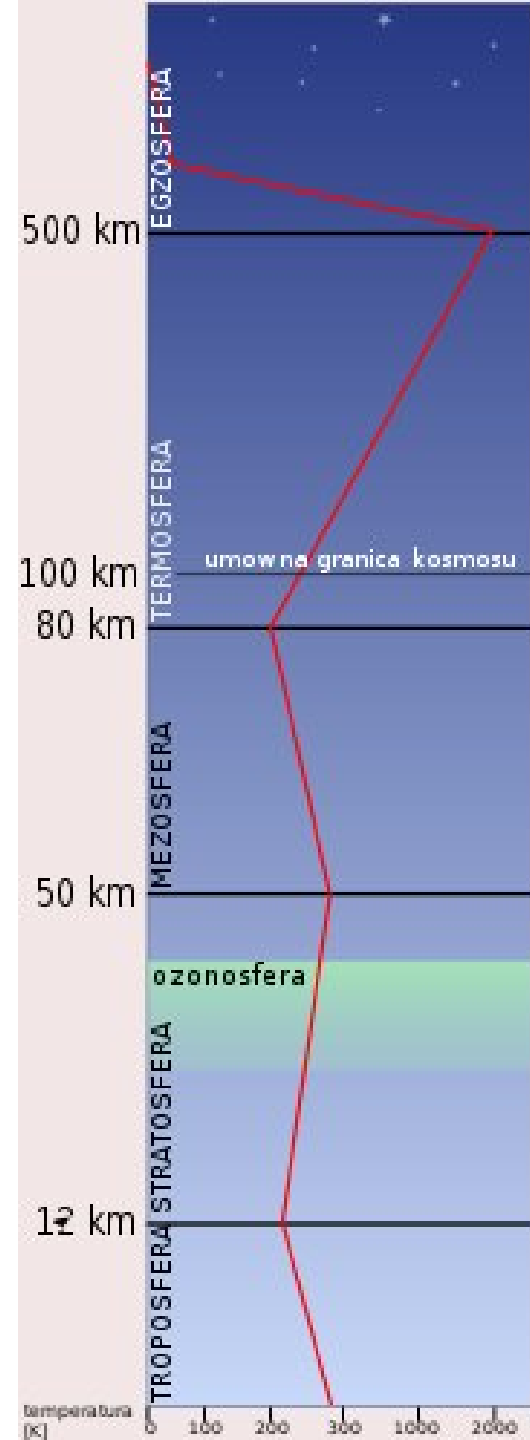


Skład atmosfery - gazy zmienne

Gaz	Symbol	% objętości	Dlaczego ważny?
Para wodna	H ₂ O	0-4	Transport ciepła, gaz cieplarniany, uczestniczy w tworzeniu różnych zjawisk (chmury)
Dwutlenek węgla	CO ₂	0,042	Gaz cieplarniany, biosfera (fotosynteza)
Metan	CH ₄	0,00019	Gaz cieplarniany, bardziej wydajny niż CO ₂
Tlenek azotu	N ₂ O	0,00003	Gaz cieplarniany
Ozon	O ₃	0,000004	Warstwa ozonowa, pochłania UV
Cząstki stałe (pyły, sadze), tzw aerozole		0,000001	Budżet energii; tworzenie chmur

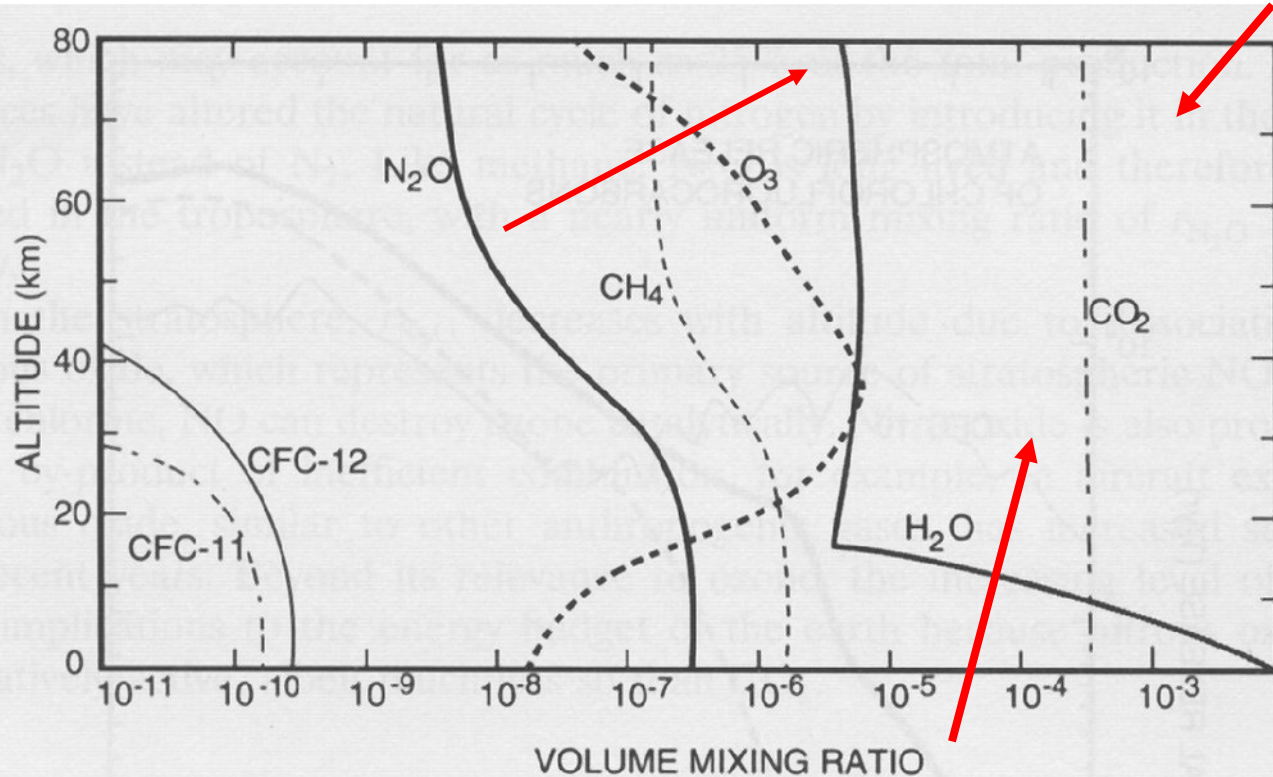
Budowa pionowa atmosfery

- Za umowną granicę przyjmuje się pierwsze 100 km. Jednak atmosfera sięga dużo wyżej.
- Warstwa do 100 km nosi nazwę homosfery charakteryzującą się stałym składem chemicznym (z wyjątkiem pary wodnej i tzw. gazów śladowych),
- Warstwa powyżej 100 km nosi nazwę heterosfery. Występuje w niej zmienny skład chemiczny gazów atmosferycznych.



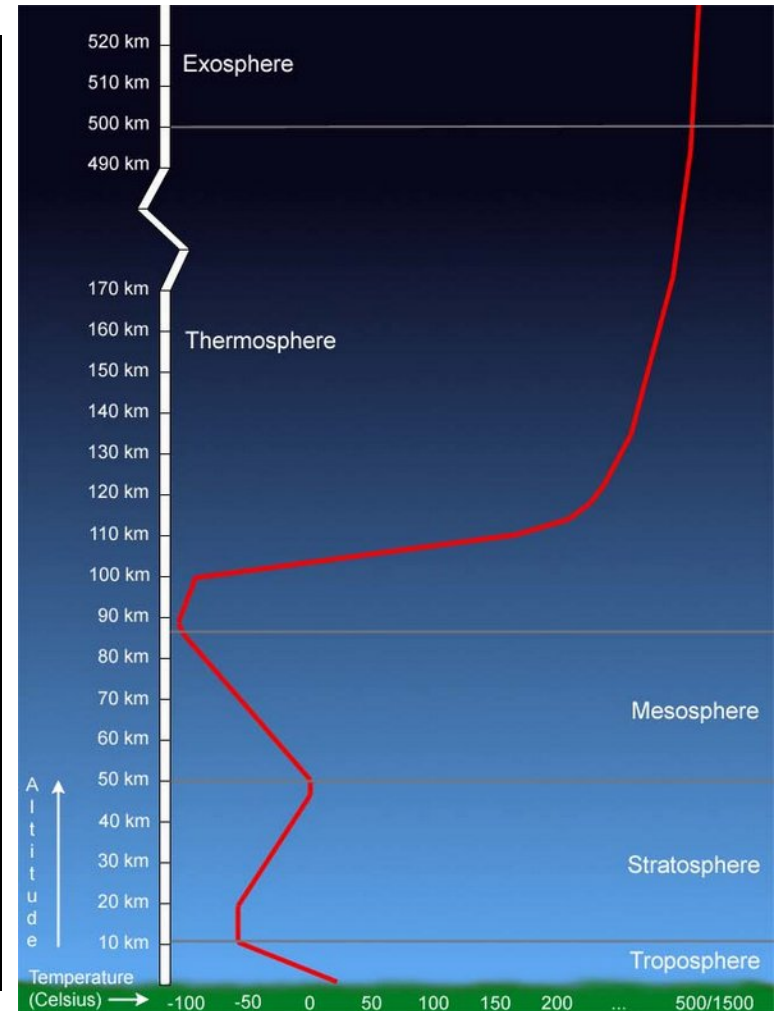
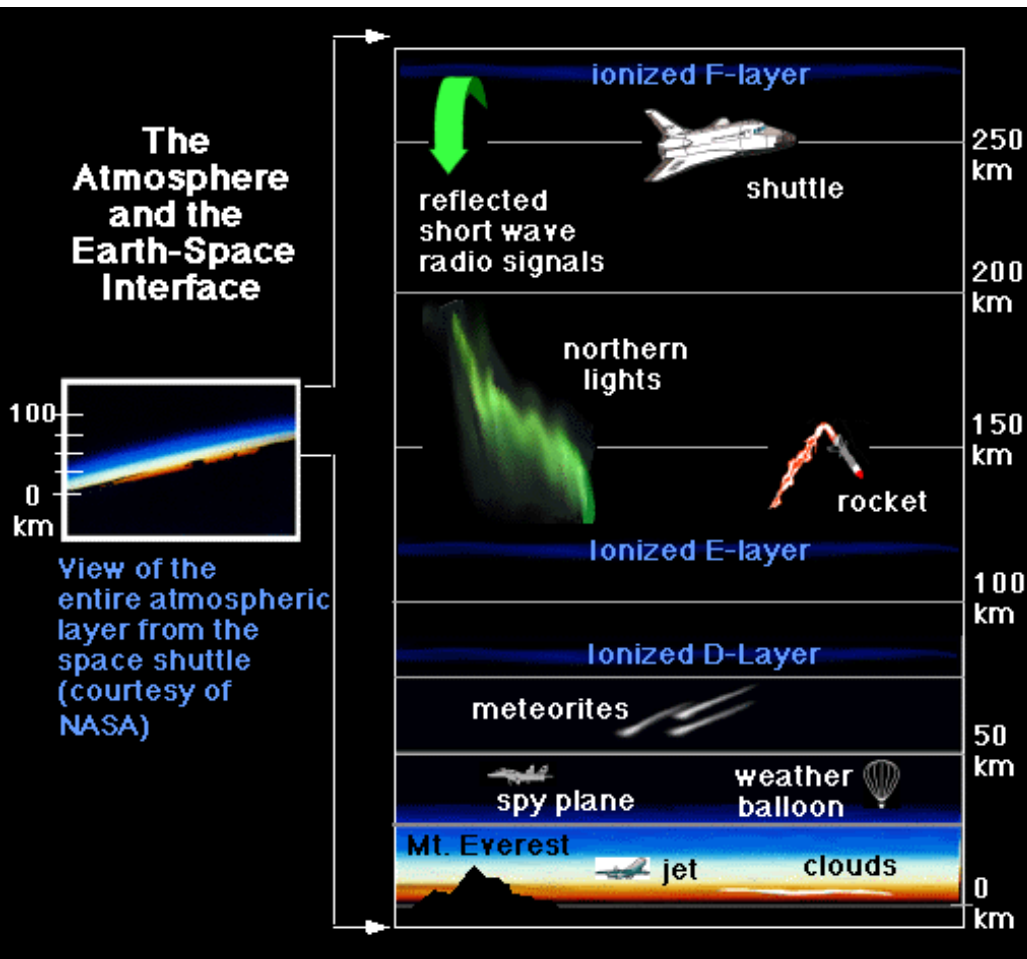
Rozkład śladowych gazów w atmosferze

Homosfera $z < 100$ km
Heterosfera $z > 100$ km

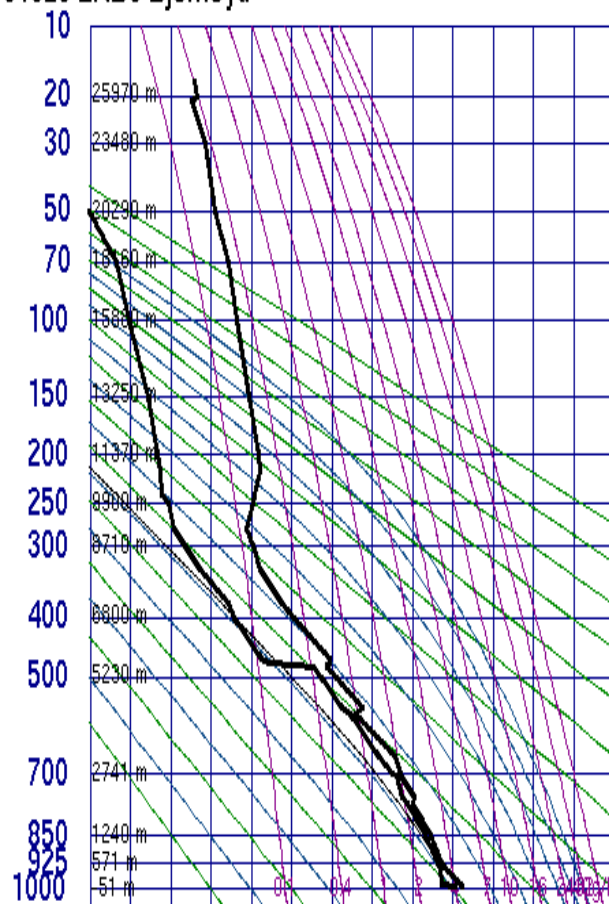


01/ **Figure 1.20** Mixing ratios of radiatively active trace species as functions of altitude. *Source:* Goody and Yung (1989).

Podział atmosfery

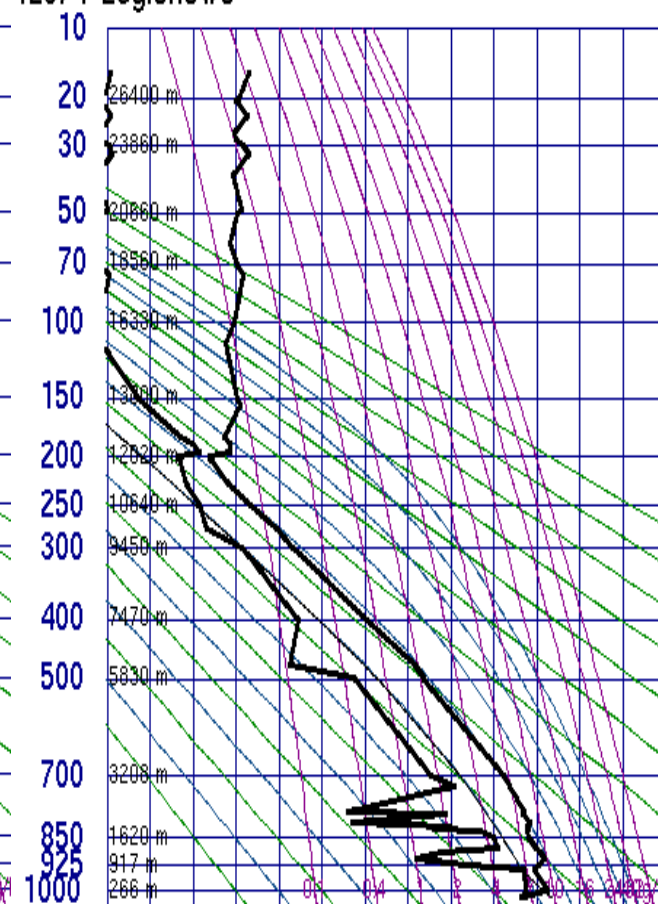


01028 ENBJ Bjornoya



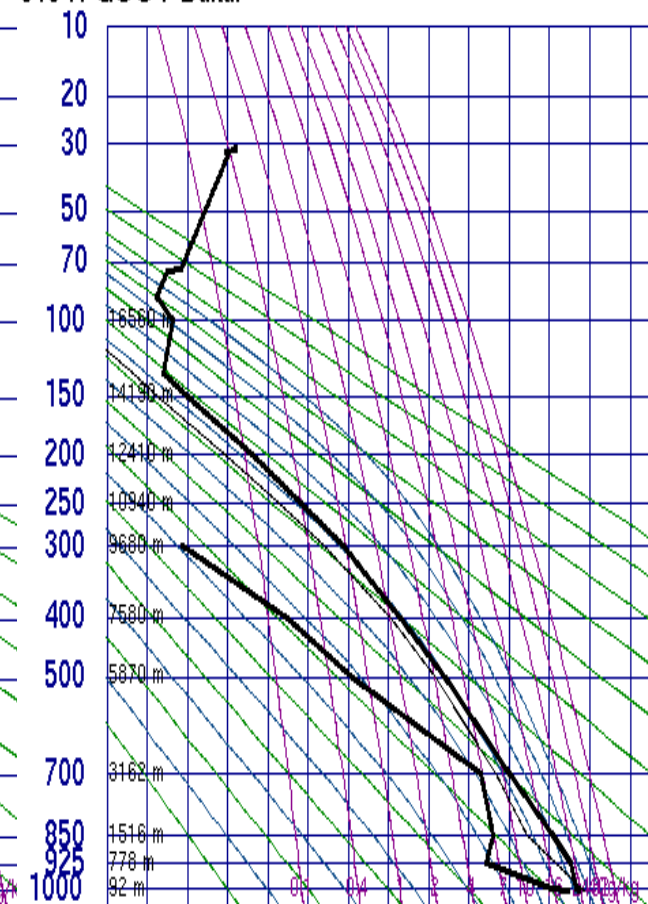
00Z 06 Oct 2005

12374 Legionowo



100Z 06 Oct 2005

61641 GOOY Dakar

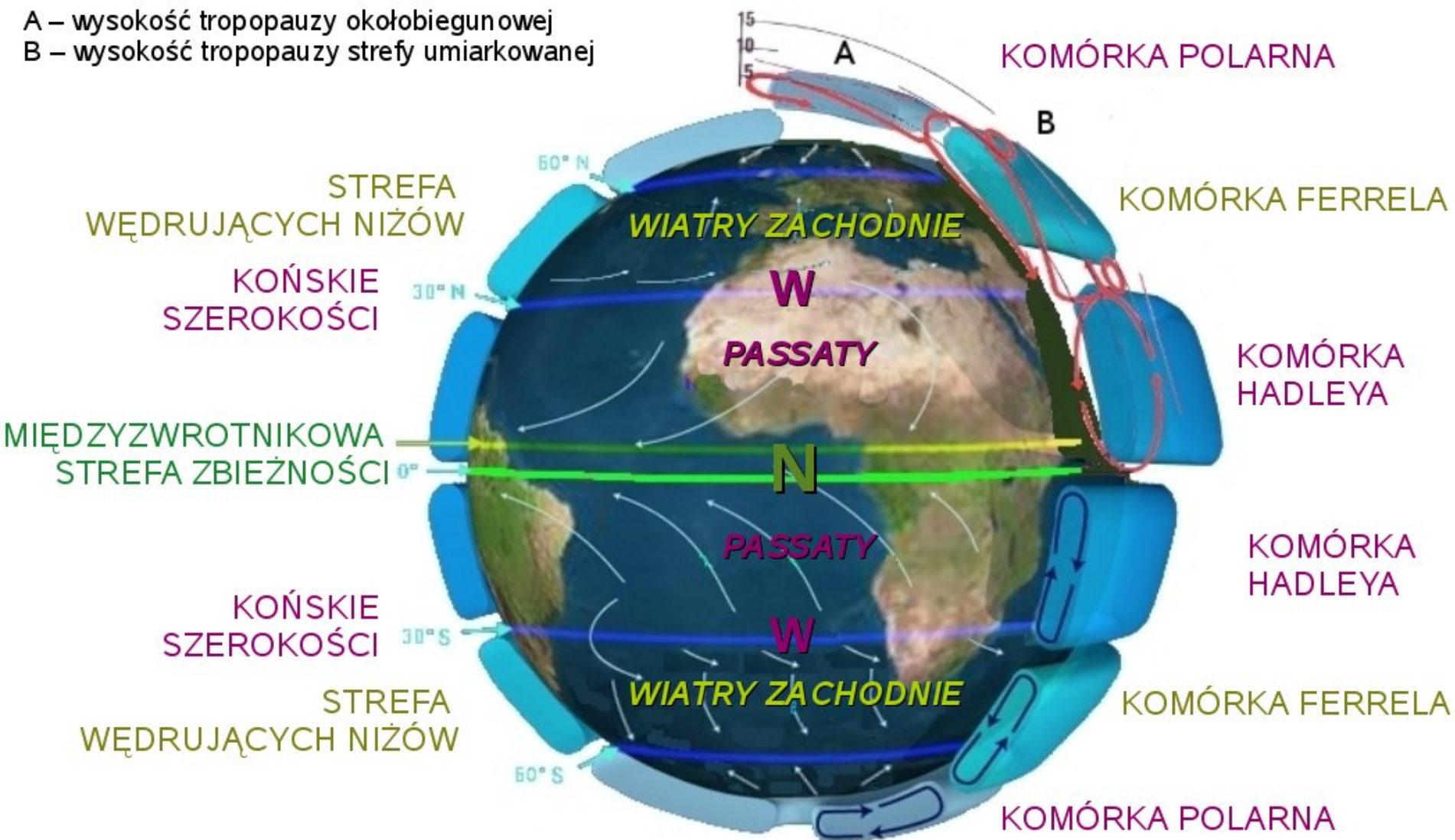


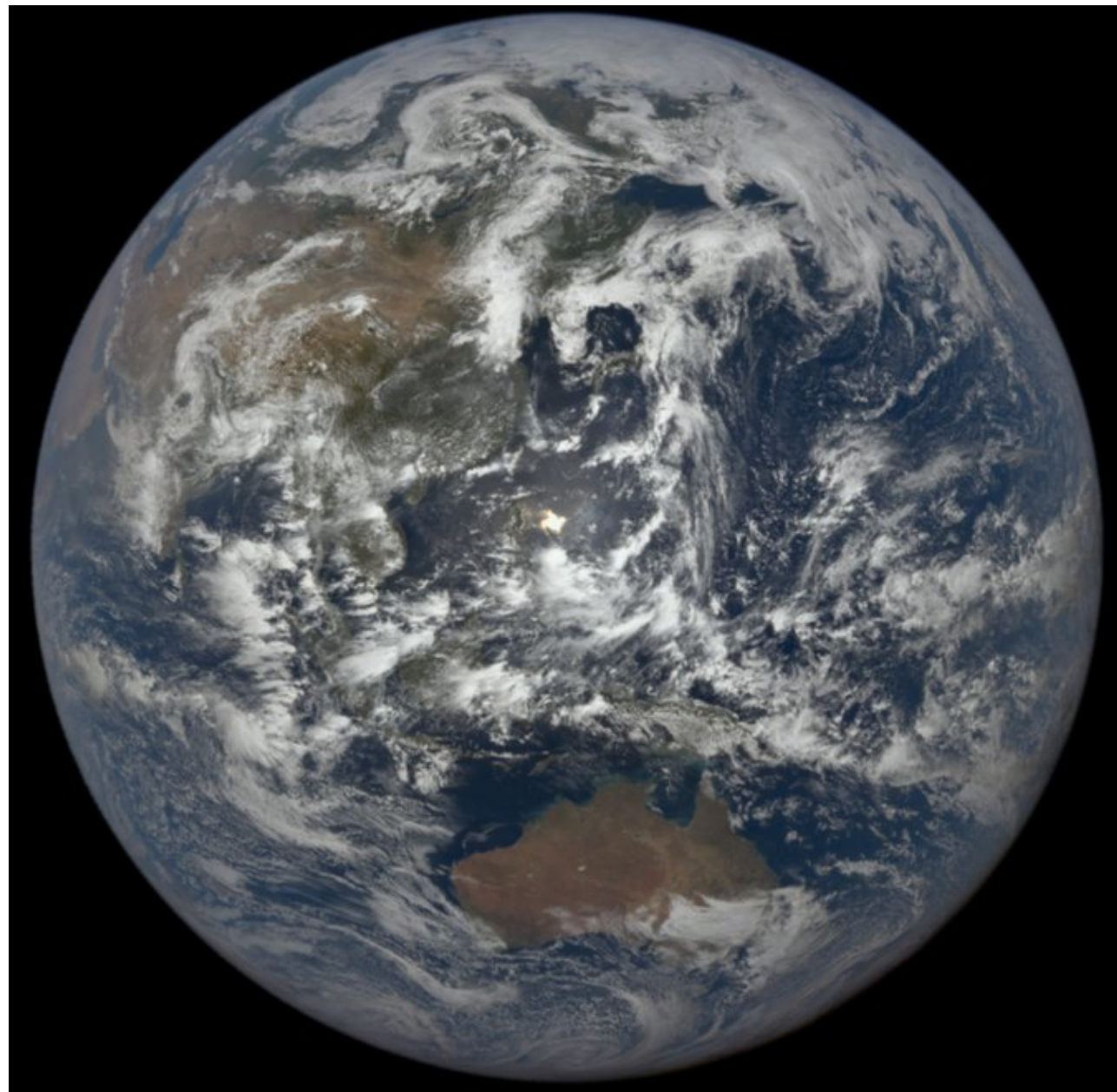
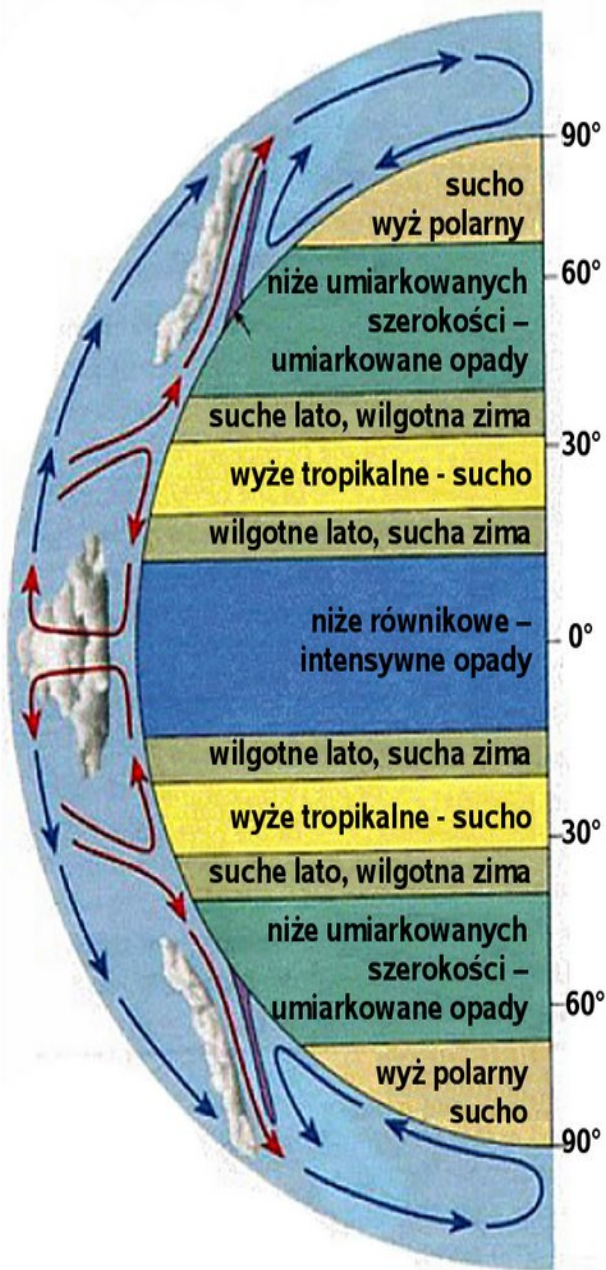
100Z 06 Oct 2005

Univ

Schemat globalnej cyrkulacji atmosfery

A – wysokość tropopauzy okołobiegunowej
B – wysokość tropopauzy strefy umiarkowanej







Weather radar

Satellite

Wind

Rain, thunder

Temperature

Clouds

Waves

Rain accumul...

Thunderstorms

PM2.5

More la

Altitude

☒ pressure ☐ particles animation

+ - 2D ↶ ↷

⏮ ⏪ ⏩ ⏭

ECMWF GFS 22km ICON 13km 15km

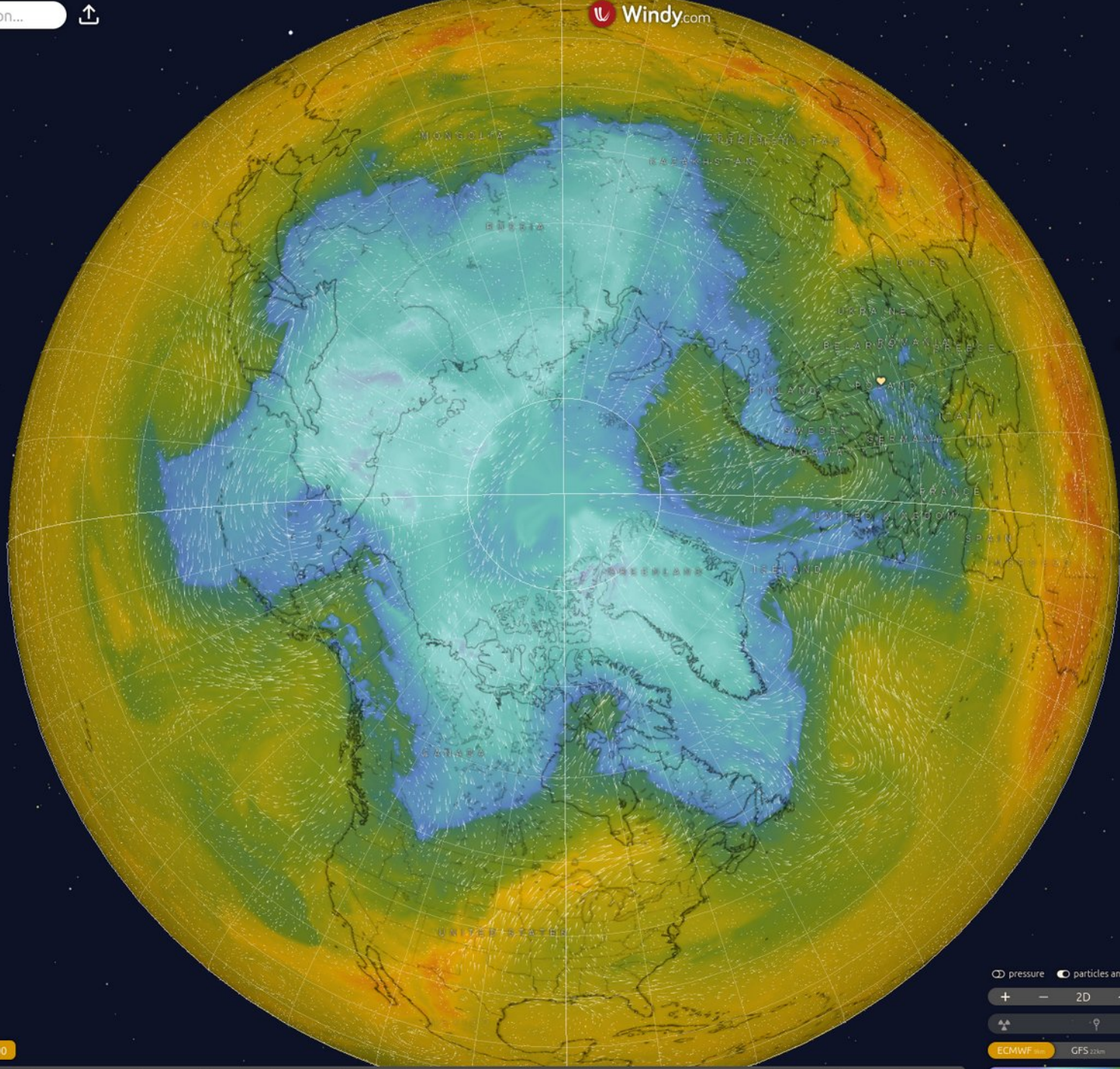
m/s 0 3 5 10 15 20

Mon 6 Tue 7 Wed 8 Thu 9 Fri 10 Sat 11 Sun 12 Mon 13 Tue 14 Wed 15 Thu 16 Fri 17 Sat 18 Sun 19

Search location...



Windy.com



- Weather ra
- Sate
- W
- Rain, thur
- Tempera
- Clo
- W
- Rain accumula
- Thundersto
- PN
- M
- 850hPa
- 1500m S

☐ pressure ☒ particles animation

+ - 2D ↶ ⓘ

⚙ ⌵

ECMWF 22km GFS 22km ICON 11km

°C -20 -10 0 10 20

Sun 5 - 8:00

- Sun 5
- Mon 6
- Tue 7
- Wed 8
- Thu 9
- Fri 10
- Sat 11
- Sun 12
- Mon 13
- Tue 14
- Wed 15
- Thu 16
- Fri 17
- Sat 18
- Sun 19