

Fizyka Procesów Klimatycznych

2026 Wykład 1

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

Materialy do wykładu

Literatura:

- Raymond T. Pierrehumbert: Principles of Planetary Climate, 2010
- WORKING GROUP I CONTRIBUTION TO THE IPCC 6th ASSESSMENT REPORT
CLIMATE CHANGE 2021: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS,
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Marcin Popkiewicz, Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski: Nauka o klimacie, 2018,
2019, 2023
- www.naukaoklimacie.pl

Uwagi ogólne

Kod przedmiotu: 1103-5 FPK

Liczba punktów ETCS: 3

Nazwa przedmiotu: Fizyka Procesów Klimatycznych

Prowadzący: Szymon Malinowski Krzysztof Markowicz,

Termin: semestr letni, wtorek, godz. 11.15-13:00

Forma zaliczenia: egzamin pisemny

Pogoda i klimat.

Parametry powietrza

Czas pomiaru: 2014-02-28 19:46:55 CET
2014-02-28 18:46:55 UTC

temperatura: 2,7 °C



wilgotność: 87,7 %



ciśnienie: 996,0 hPa



temperatury ekstremalne	min	max	
bieżąca doba 00 ⁰⁰ - 24 ⁰⁰ UTC	-0,8	5,1	°C
poprzednia doba 00 ⁰⁰ - 24 ⁰⁰ UTC	-1,4	9,5	

temperatury ekstremalne	min	max	
18 ⁰⁰ - 06 ⁰⁰ UTC	2,7	3,1	°C
06 ⁰⁰ - 18 ⁰⁰ UTC	-0,7	5,1	

temperatura punktu rosy	0,9	°C
temperatura odczuwalna	-4,1	°C
ciśnienie zredukowane	1009,7	hPa

Parametry wiatru

prędkość w porzywie
obliczona 10 min

5,7 m/s

prędkość: 4,4 m/s



kierunek: 94,0 °



Promieniowanie słoneczne

moc: 0,0 W/m2



usłonecznienie
od świtu

5,1 h

Opad atmosferyczny

opad [mm]	opad [mm]
1h 0,0	9h 0,0
2h 0,0	12h 0,0
3h 0,0	15h 0,0
4h 0,0	18h 0,0
5h 0,0	21h 0,0
6h 0,0	24h 0,0



Temperatura gruntu

t (+10cm): 2,5 °C



t (-10cm): 2,8 °C



t (-50cm): 2,9 °C



POLTEMP 1.0H9

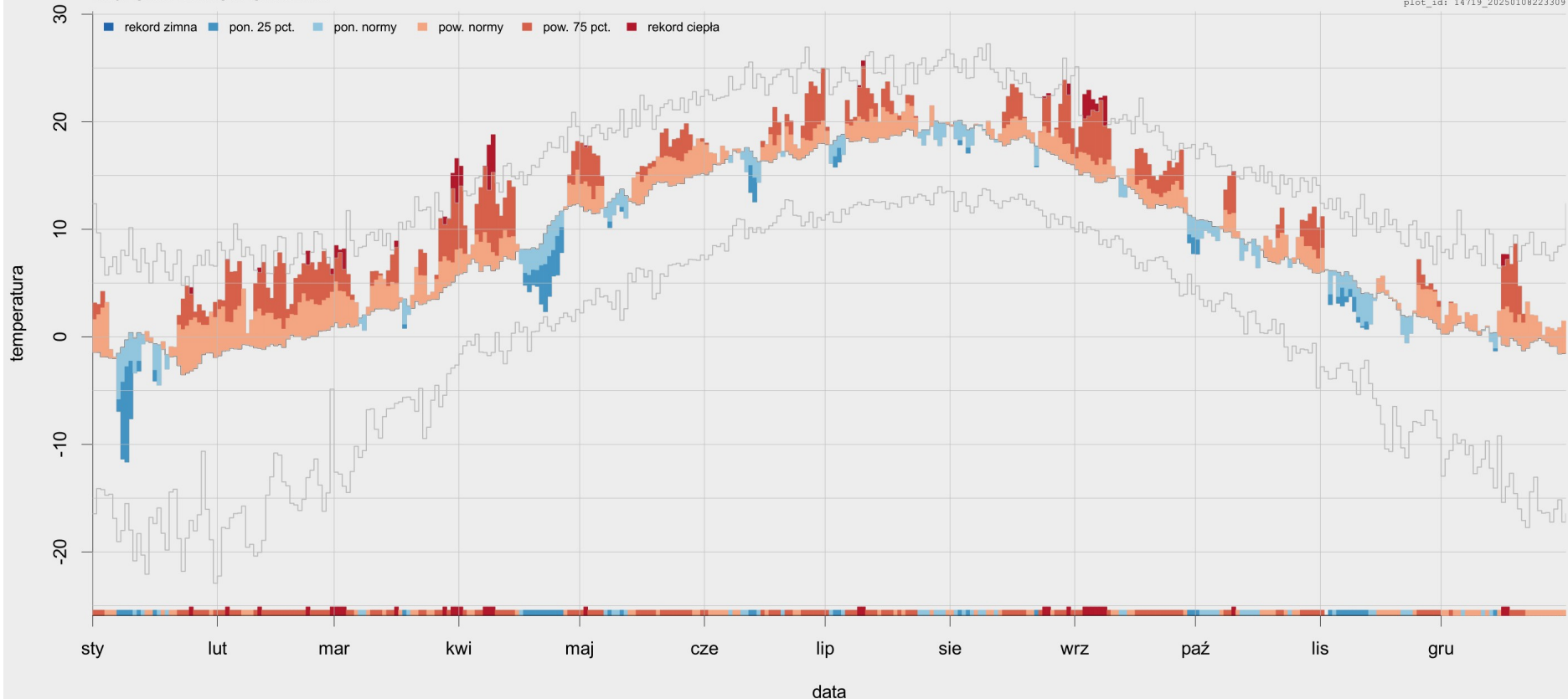
Zakres danych: 2024-01-01 - 2024-12-31

Wartości max/min bez uwzględnienia wybranego okresu
Design wykresu wzorowany na wykresach ZAMG

Anomalia: 2.25

Okres referencyjny: 1991-2020

plot_id: 14719_20250108223309



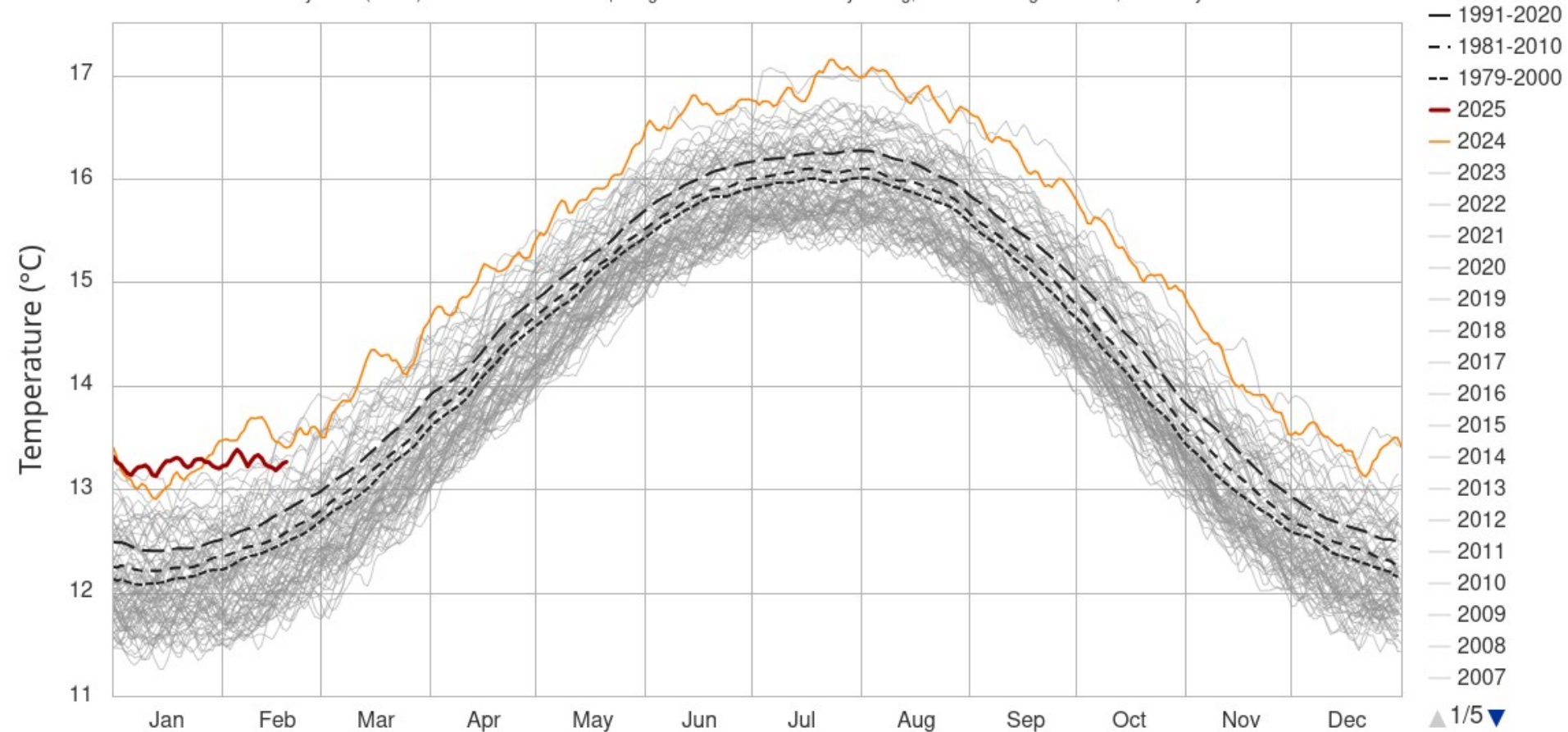
Dni ciepłe: 273 (rekordy: 31). Max anom.: 12.64

(c) 2023-2024 Meteomodel.pl

Dni zimne: 92 (rekordy: 0). Min anom.: -11.34

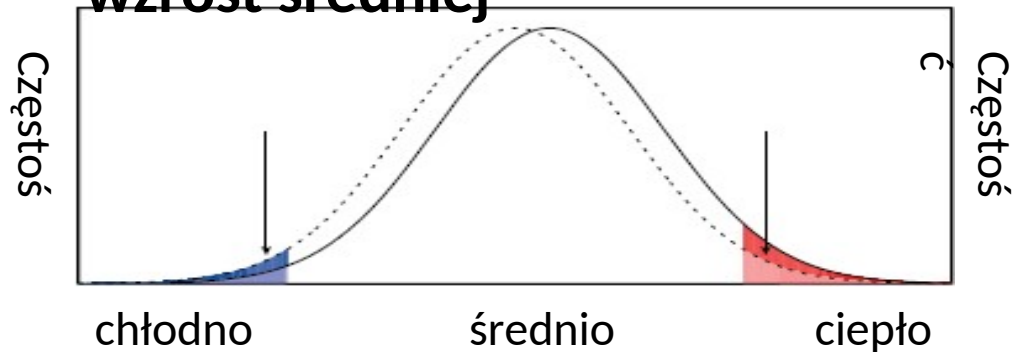
Daily Surface Air Temperature, World (90°S–90°N, 0–360°E)

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

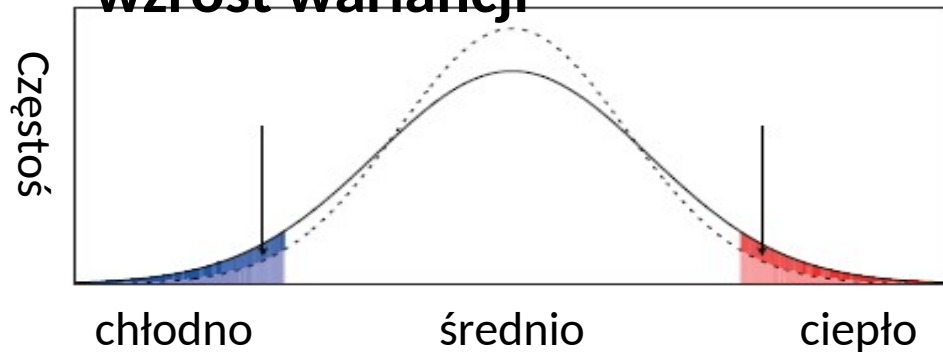


Przykład: zmiany w rozkładzie temperatur

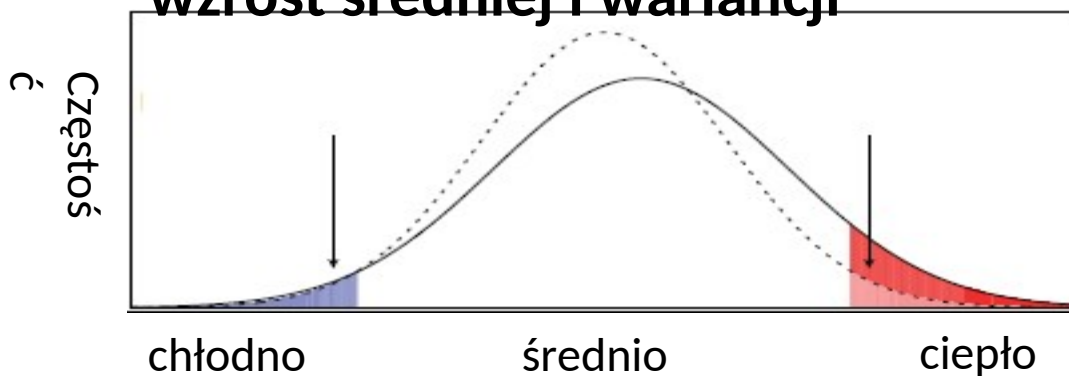
wzrost średniej



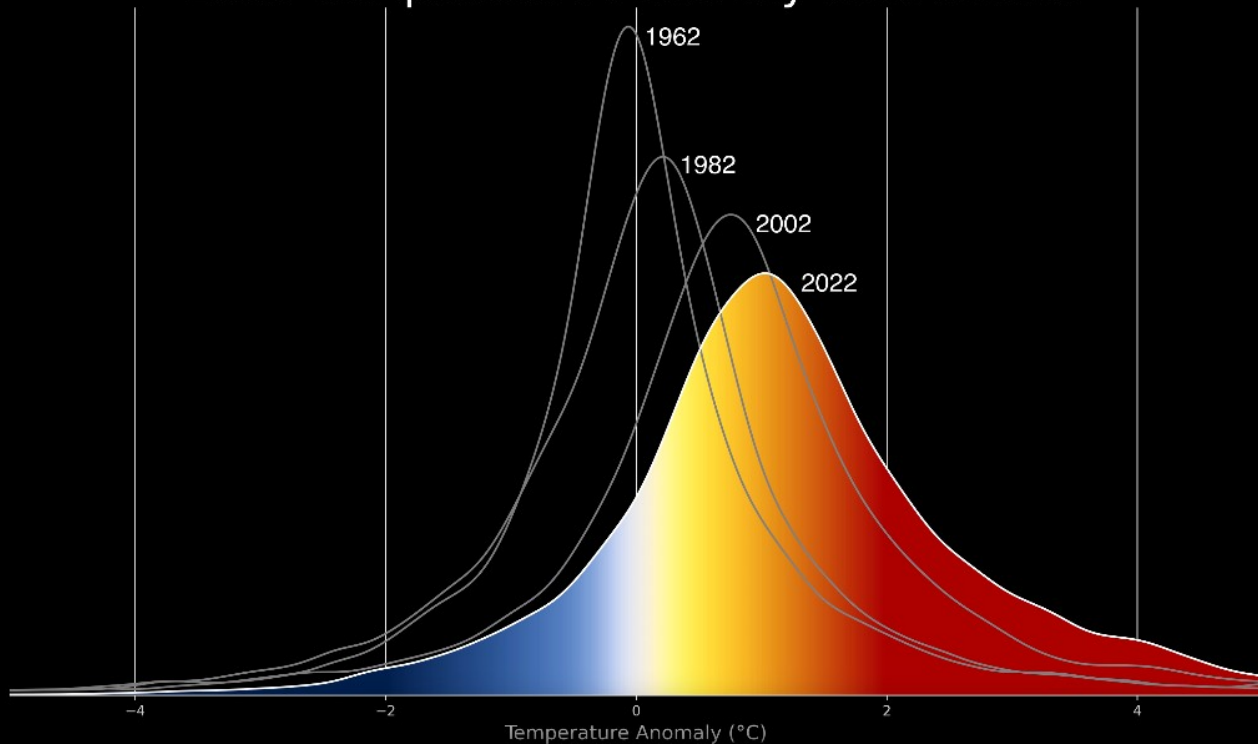
wzrost wariancji



wzrost średniej i wariancji

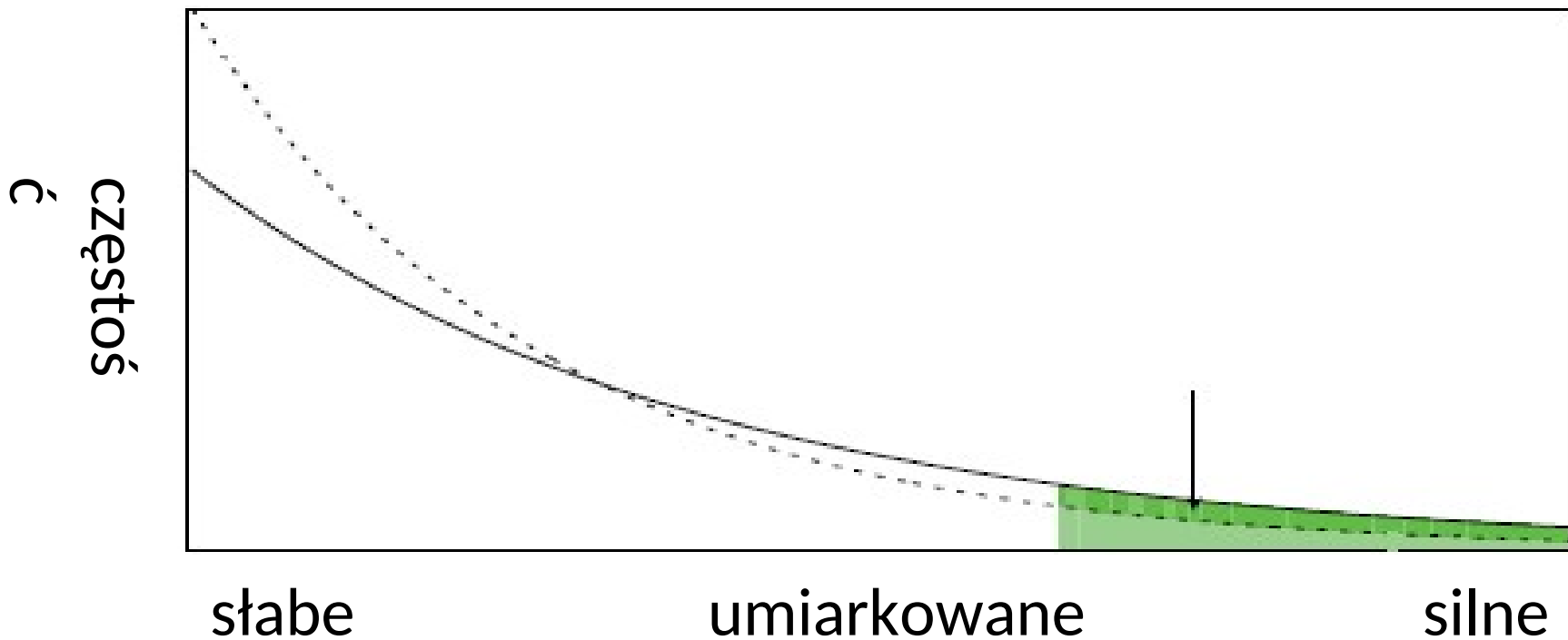


Land Temperature Anomaly Distribution



Częstotliwość występowania lokalnych odchyłeń temperatury latem na lądach półkuli północnej względem okresu bazowego 1951–1980 .

Przykład: zmiany w rozkładzie intensywności opadów



METEOROLOGY GLOSSARY

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY

glossary *of* meteorology

Weather:

The state of the atmosphere, mainly with respect to its effects upon life and human activities.

As distinguished from climate, weather consists of the short-term (minutes to days) variations in the atmosphere. Popularly, weather is thought of in terms of temperature, humidity, precipitation, cloudiness, visibility, and wind.

Climate:

The slowly varying aspects of the atmosphere–hydrosphere–land surface system.

It is typically characterized in terms of suitable averages of the climate system over periods of a month or more, taking into consideration the variability in time of these averaged quantities.

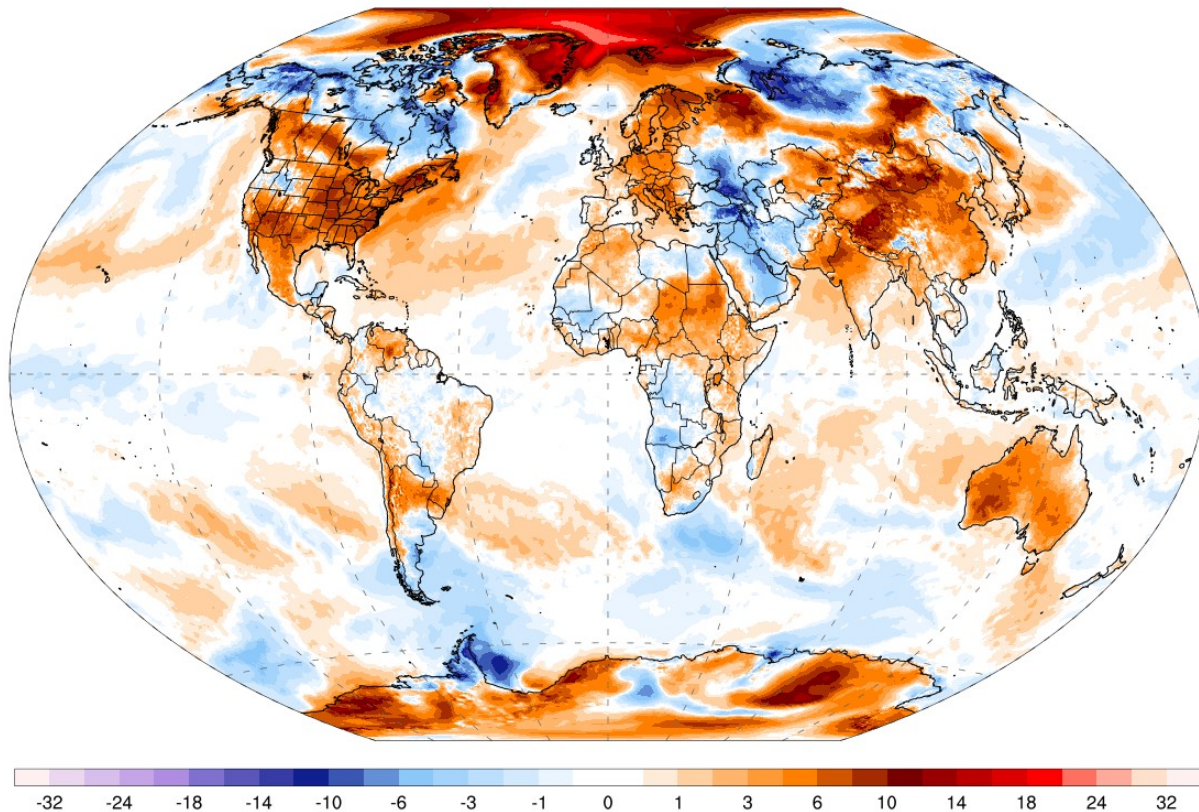
Anomalie pogodowe i klimatyczne

GFS 2m T Anomaly (°C) [CFSR 1979-2000 baseline]

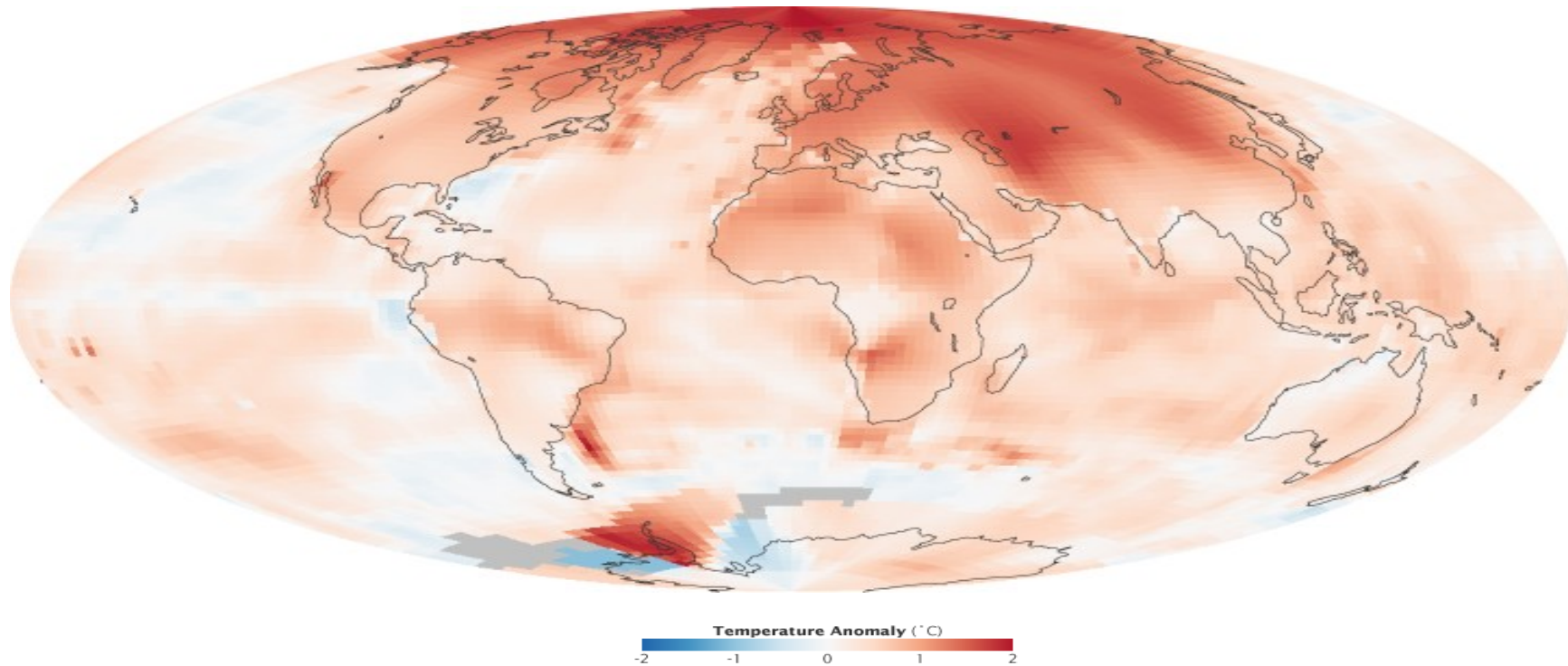
1-day Avg | Wed, Feb 26, 2025

[ClimateReanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org)

Climate Change Institute | University of Maine

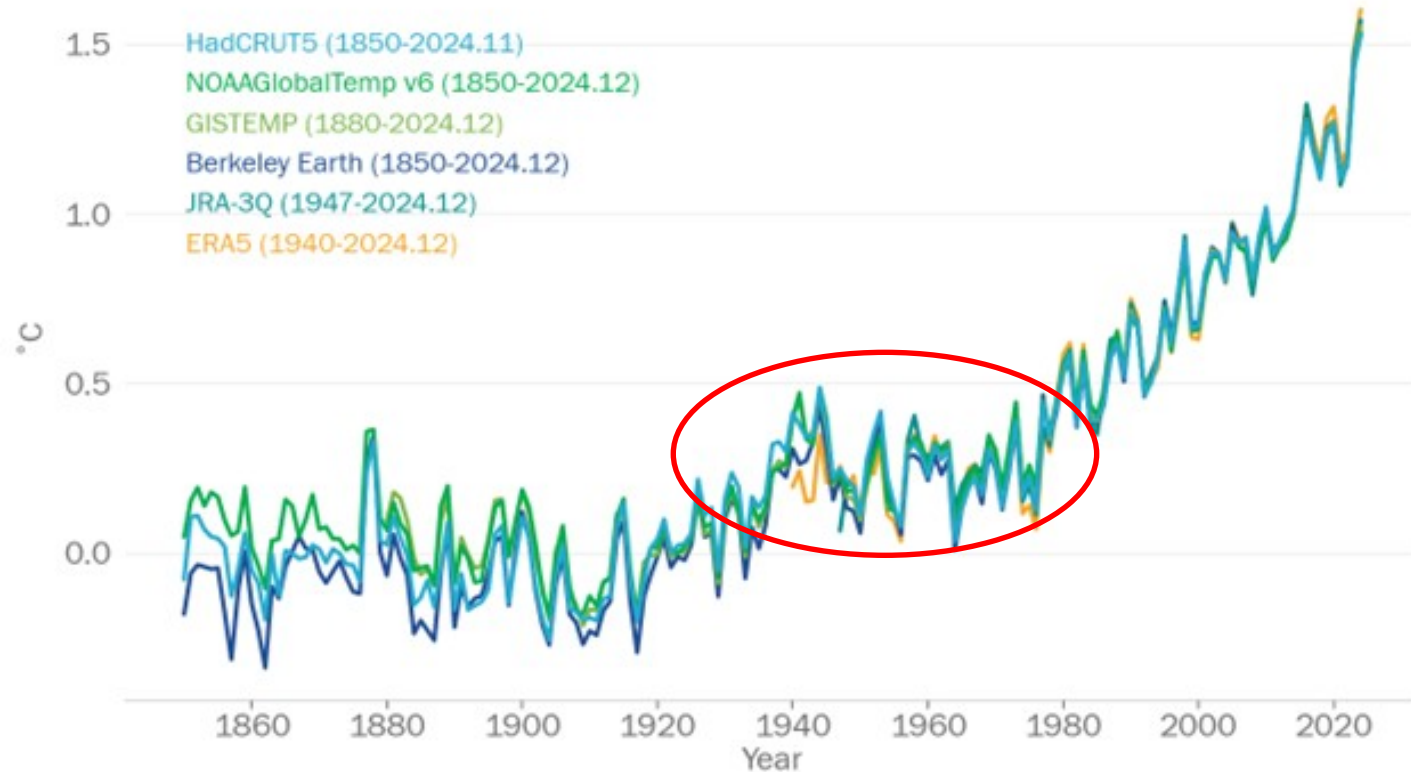


Przykład: średnia anomalia temperatury 2000-2009 względem lat 1951-1980

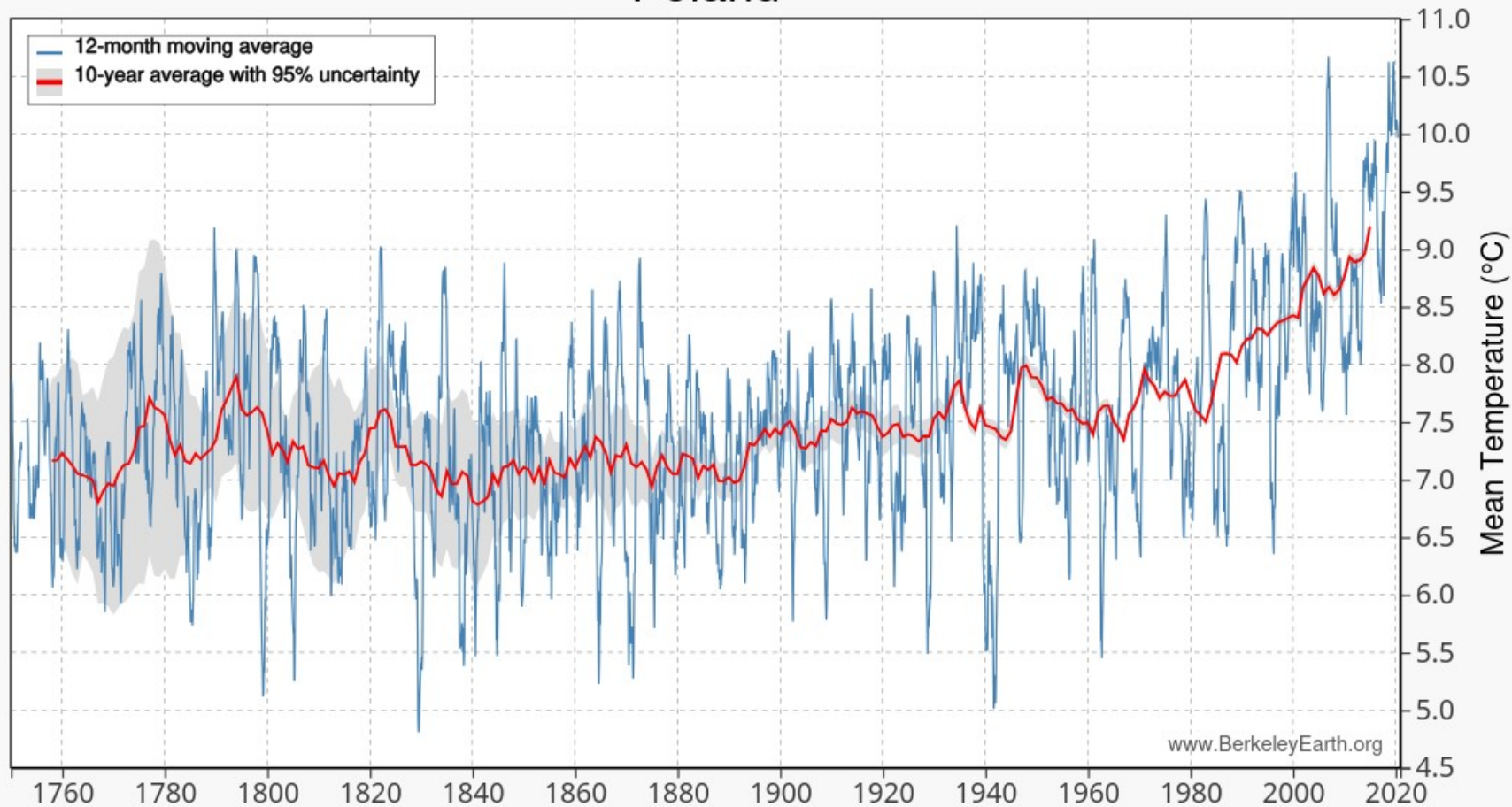


Anomalie c.d.

Global mean temperature 1850-2024
Difference from 1850-1900 average



Poland

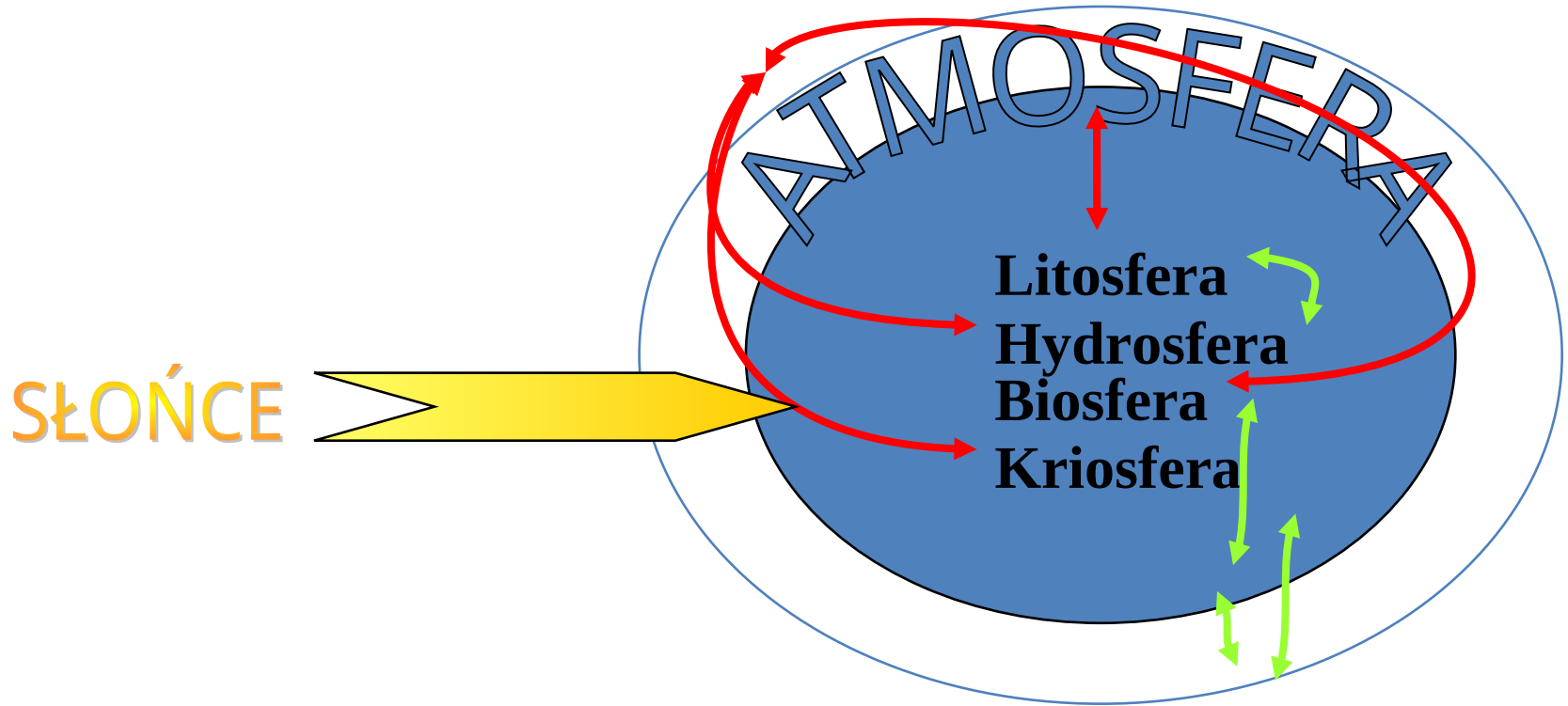


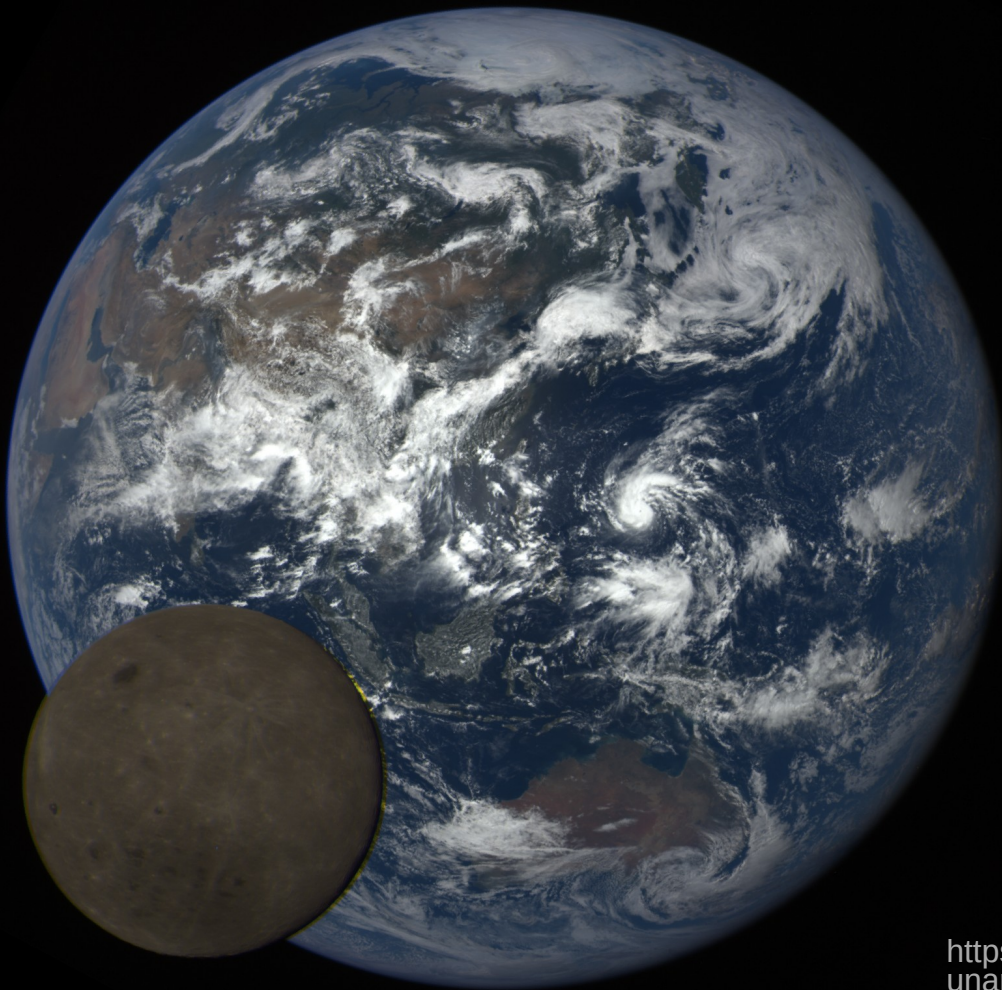
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I-XII	DJF	MAM	JJA	SON	DJFM	NDJFM	AMJJAS	ONDJFM
1951	6	6	6	6	9	7	5	7	3	10	3	3	6	6	6	5	5	6	6	6	6
1952	4	6	11	3	9	9	6	5	11	9	9	8	9	4	9	7	11	7	6	5	6
1953	6	7	6	5	7	3	4	8	6	4	7	7	6	6	6	5	6	7	7	5	6
1954	10	11	6	11	6	3	9	7	5	6	5	3	9	11	9	7	6	9	10	8	10
1955	7	8	7	11	10	5	7	5	5	7	6	7	9	5	11	7	6	7	8	9	7
1956	6	11	9	10	8	6	8	11	8	7	11	6	11	9	10	9	11	9	9	10	9
1957	5	3	6	7	11	4	6	10	9	6	6	8	6	4	8	6	7	4	6	9	6
1958	6	5	11	11	3	10	5	7	9	4	6	5	6	6	11	9	5	10	7	8	7
1959	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	5	4	7	5	5	5	5	4
1960	7	8	7	9	7	6	9	8	9	5	4	2	8	8	8	9	6	7	8	9	8
1961	8	4	2	3	9	4	10	9	4	3	6	9	6	4	4	9	3	3	3	6	3
1962	4	7	9	3	10	11	11	9	4	7	6	10	9	7	9	11	8	8	8	10	7
1963	11	10	9	6	4	4	5	4	7	2	11	11	11	9	11	9	5	11	11	11	11
1964	8	9	11	6	6	1	6	10	6	8	5	7	8	9	10	6	8	10	9	6	9
1965	5	9	8	9	11	7	10	11	5	9	11	6	11	8	10	11	10	8	7	11	8
1966	9	5	6	6	6	5	7	5	8	1	8	6	6	7	8	6	5	6	8	6	8
1967	8	4	8	5	7	5	7	5	7	1	6	8	4	6	5	6	1	5	6	6	4
1968	8	6	6	4	9	3	5	6	5	6	6	9	7	7	6	6	6	6	6	6	6
1969	9	9	10	9	4	7	6	8	6	6	4	11	10	10	9	7	4	10	10	6	10
1970	9	9	8	8	6	8	8	8	8	5	6	1	9	11	9	8	7	11	11	9	11
1971	7	5	5	7	3	9	6	3	10	6	7	1	6	6	7	6	9	7	6	6	8
1972	10	5	5	6	6	3	7	9	11	5	6	7	7	6	9	6	5	6	6	7	6
1973	6	4	5	9	7	7	7	7	6	9	9	7	6	7	5	6	7	10	5	4	8
1974	4	3	4	8	10	11	11	6	6	10	6	2	6	4	7	10	8	4	4	10	5
1975	1	6	4	8	5	8	5	4	1	7	5	6	4	2	5	6	6	2	3	5	9
1976	6	5	8	8	8	5	11	7	8	5	3	7	6	2	7	9	7	3	3	3	7
1977	6	4	3	9	8	5	9	9	11	5	4	7	6	6	6	9	6	5	4	11	5
1978	6	8	6	9	9	9	10	10	10	5	4	9	9	7	8	11	7	6	6	11	6
1979	9	9	7	8	1	11	8	6	10	7	3	8	8	10	6	8	9	9	9	7	9
1980	9	6	10	11	10	9	9	7	4	7	6	11	11	7	11	10	5	7	8	11	8
1981	7	6	4	10	4	5	8	9	5	5	6	9	7	7	6	8	6	6	6	7	6
1982	8	7	5	10	6	8	6	4	2	5	4	4	6	9	6	6	3	8	8	6	7
1983	1	7	4	3	3	6	5	6	5	5	9	7	4	4	2	5	6	3	3	4	3
1984	4	5	1	6	6	11	11	3	8	3	8	3	7	5	7	11	5	5	7	3	5
1985	11	11	7	6	3	11	8	6	6	10	3	3	10	11	6	9	10	11	11	8	11
1986	6	11	7	6	3	7	7	7	11	6	4	6	8	8	5	8	7	8	9	7	9
1987	11	6	11	7	9	8	7	11	6	6	6	6	11	9	11	9	6	10	10	9	10
1988	3	4	3	4	5	7	6	7	6	7	10	5	6	3	3	4	5	4	4	6	4
1989	2	1	2	4	6	8	6	6	4	3	9	5	3	1	3	7	5	1	3	6	3
1990	2	1	1	6	5	6	8	6	10	5	5	6	3	1	3	6	6	1	1	8	1
1991	4	7	4	7	11	10	5	6	4	8	6	5	7	6	7	6	6	6	5	8	5
1992	5	4	5	7	5	11	7	11	6	11	6	7	4	5	6	11	6	7	4	4	7
1993	4	6	7	4	1	9	9	9	9	6	11	4	7	5	4	10	11	6	6	7	6
1994	2	7	4	4	8	5	1	5	4	9	6	4	4	4	5	3	6	4	6	4	6
1995	6	2	6	6	3	6	3	5	6	3	10	10	6	3	6	4	8	3	3	6	4
1996	9	10	10	10	6	7	6	9	6	11	4	9	11	10	9	8	5	11	11	5	11
1997	8	3	6	11	6	6	7	3	6	9	7	6	6	6	8	5	8	7	6	7	6
1998	3	2	7	2	4	9	4	6	7	11	9	6	5	3	4	7	11	3	4	5	4
1999	3	6	4	3	7	5	3	6	1	6	8	5	3	6	4	4	5	5	7	3	7
2000	6	3	5	1	2	5	9	3	6	1	1	3	2	2	1	2	2	4	4	4	4
2001	4	6	6	6	4	10	3	8	5	1	1	9	6	4	6	5	5	4	3	6	3
2002	5	1	3	5	1	4	2	1	6	9	5	11	3	5	2	1	7	4	4	1	3
2003	6	9	6	7	1	3	3	3	5	11	3	4	6	9	5	3	7	9	9	3	9
2004	3	5	6	5	7	5	7	3	6	3	6	4	5	6	6	6	4	6	5	6	6
2005	3	7	4	4	6	7	4	7	3	7	4	7	6	5	5	7	5	6	6	5	5
2006	10	7	9	5	6	4	1	6	1	2	1	1	4	9	7	2	1	9	9	2	9
2007	1	5	1	3	2	1	6	4	7	7	9	6	3	1	1	3	9	1	1	3	1
2008	3	3	5	5	6	4	5	5	7	4	4	5	2	2	4	4	4	3	5	3	1
2009	7	6	5	1	6	4	3	4	3	5	7	2	5	5	3	3	5	5	5	3	4
2010	11	6	6	5	7	5	1	3	8	11	3	11	8	9	6	2	6	9	7	4	8
2011	5	8	6	1	5	3	6	4	3	6	7	2	4	8	3	4	5	8	7	2	8
2012	5	10	7	3	3	6	3	4	4	6	3	9	5	6	2	4	3	6	6	3	6
2013	7	6	10	6	3	4	4	4	4	3	3	3	7	3	1	4	3	9	4	7	7
2014	6	3	1	2	5	7	1	6	3	4	3	5	2	3	1	4	2	2	1	3	1
2015	3	4	3	6	6	6	4	1	3	8	3	1	1	3	4	2	3	3	2	2	2
2016	7	2	5	4	2	2	4	6	1	3	5	3	3	2	3	3	5	2	2	1	2
2017	1	1	7	7	5	3	3	3	4	4	3	3	3	4	3	5	3	5	4	3	3
2018	3	8	6	1	1	2	2	1	2	3	5	4	1	5	1	1	2	6	5	1	5
2019	6	3	2	3	7	1	5	2	4	2	1	1	1	3	3	1	1	3	2	1	2
2020	1	1	4	4	9	2	6	2	3	2	2	4	1	1	5	3	1	1	1	4	1
2021	6												1								

Klasy:	
1	Ekstremalnie ciepły
2	Anomalnie ciepły
3	Bardzo ciepły
4	Ciepły
5	Lekko ciepły
6	Normalny
7	Lekko chłodny (lekko mroźny)
8	Chłodny (mroźny)
9	Bardzo chłodny (b. mroźny)
10	Anomalnie chłodny (a. mroźny)
11	Ekstremalnie chłodny (e. mroźny)

Okres ref. dla statystyk: 1951-2020

System klimatyczny





Klimat

- inne ujęcie
- warunki na powierzchni planety

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

intensywne rozpraszanie
promieniowania

słabe rozpraszanie
promieniowania

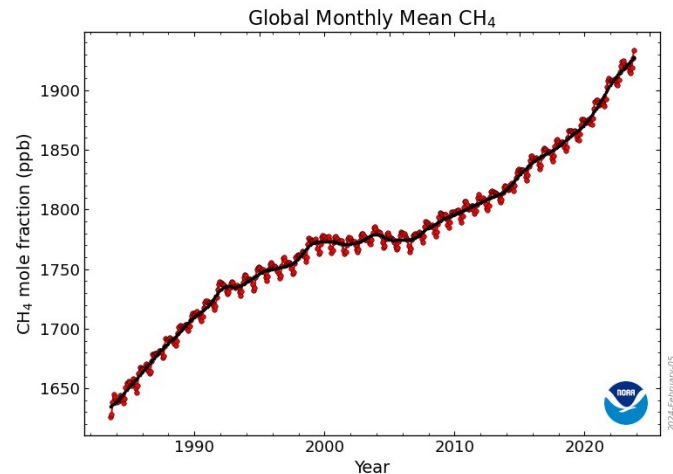
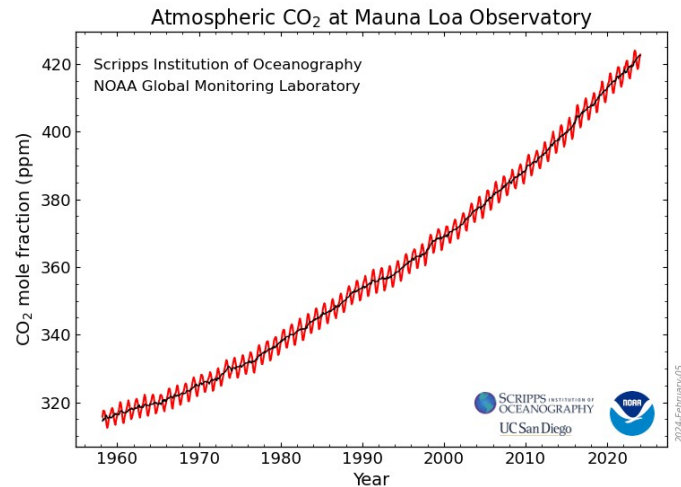


atmosfera



Skład atmosfery 1

gaz	% objętości	
Azot [N ₂]	78,08	biosfera
Tlen [O ₂]	21	pochłanianie UV, oddychanie
Argon [Ar]	0,9	gaz nieaktywny, właściwie nieistotny



Skład atmosfery 2

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	0,0425	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, pochłanianie UV
Cząstki stałe (pyły, sadze), tzw aerozole		0,000001	Budżet energii; tworzenie chmur

Rozkład śladowych gazów w atmosferze

Homosfera $z < 100$ km

Heterosfera $z > 100$ km

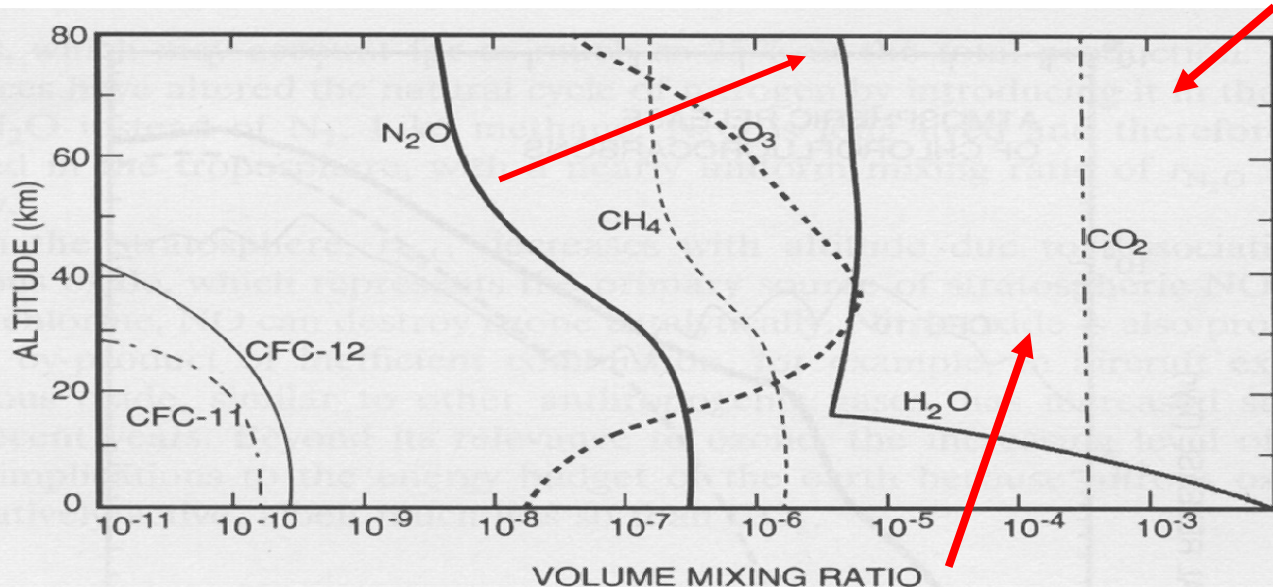
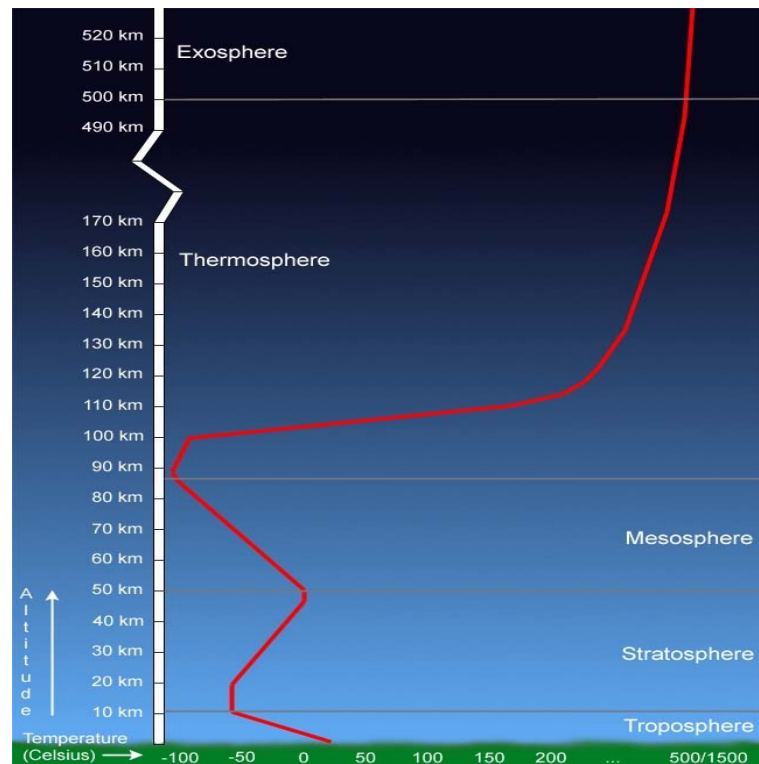
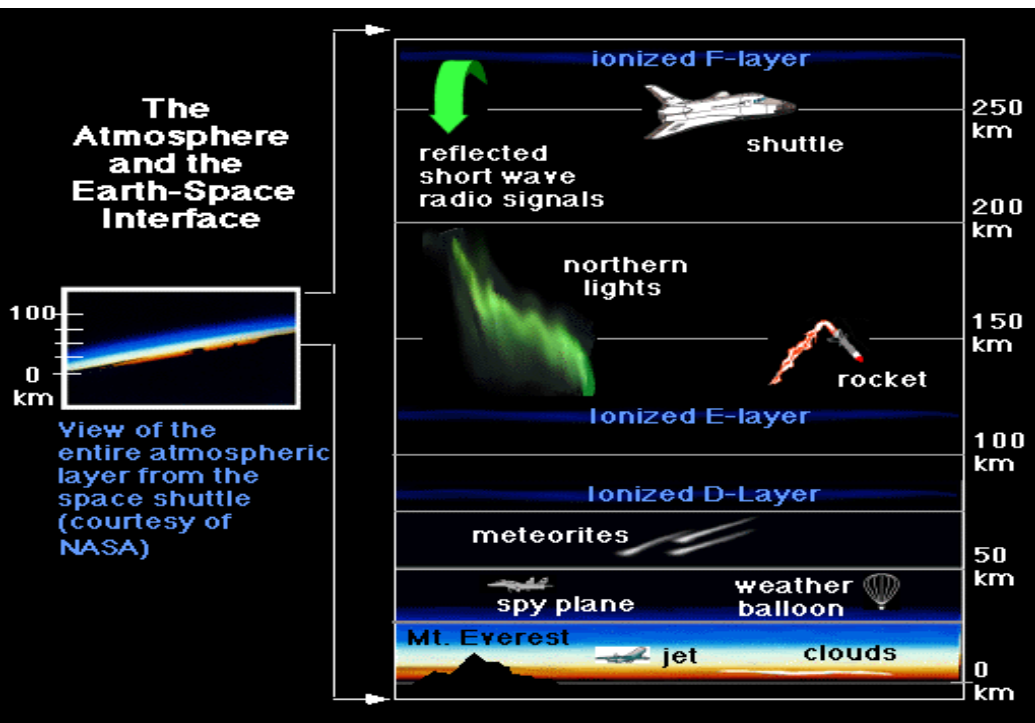


Figure 1.20 Mixing ratios of radiatively active trace species as functions of altitude. *Source:* Goody and Yung (1989).

Podział atmosfery

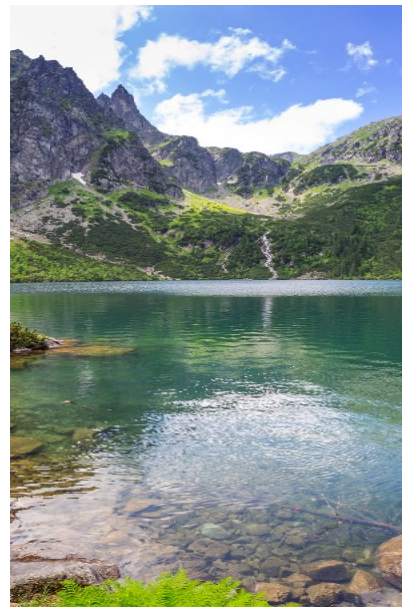
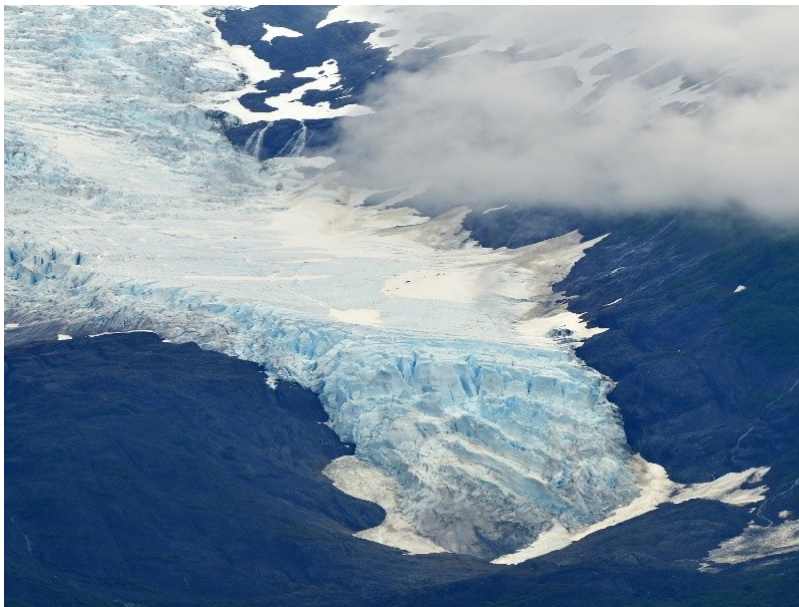


Hydrosfera



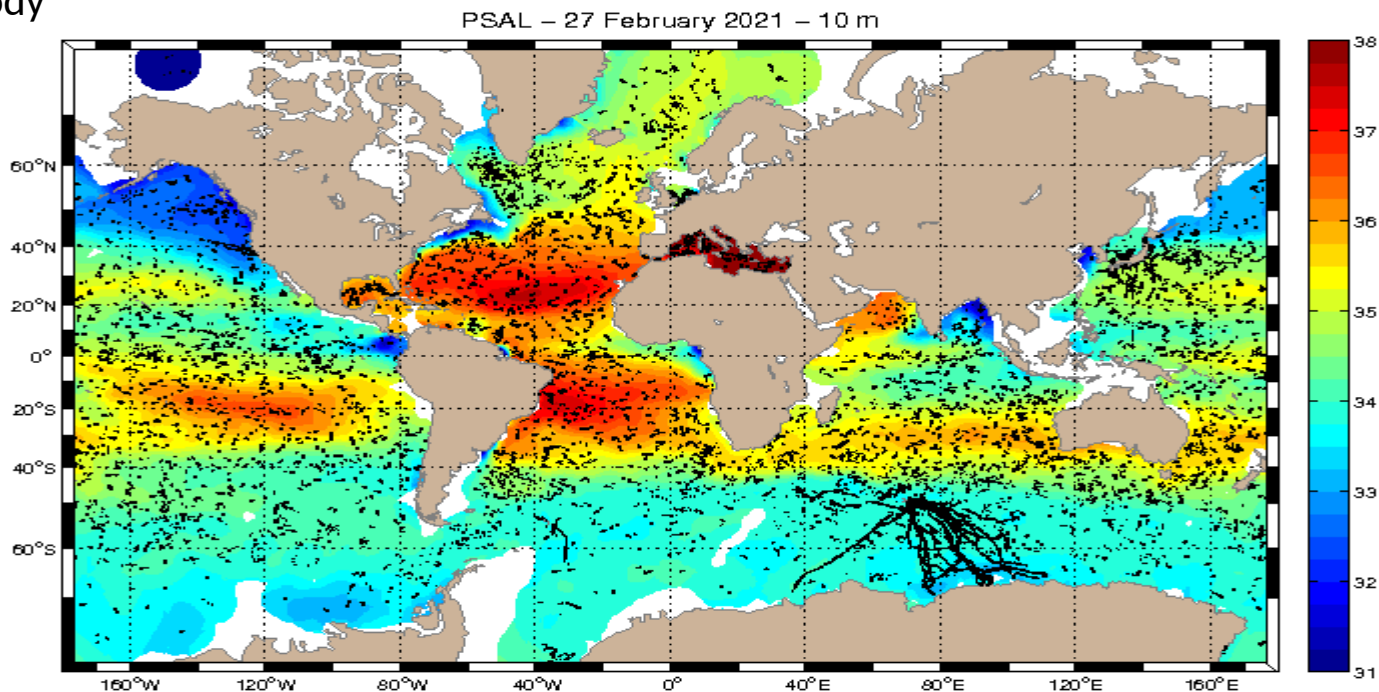
Woda słodka

0,6% zasobów wody, w tym tylko 0,1% to wody powierzchniowe.



Practical salinity unit (PSAL, PSU) określane na podstawie przewodności elektrycznej wody

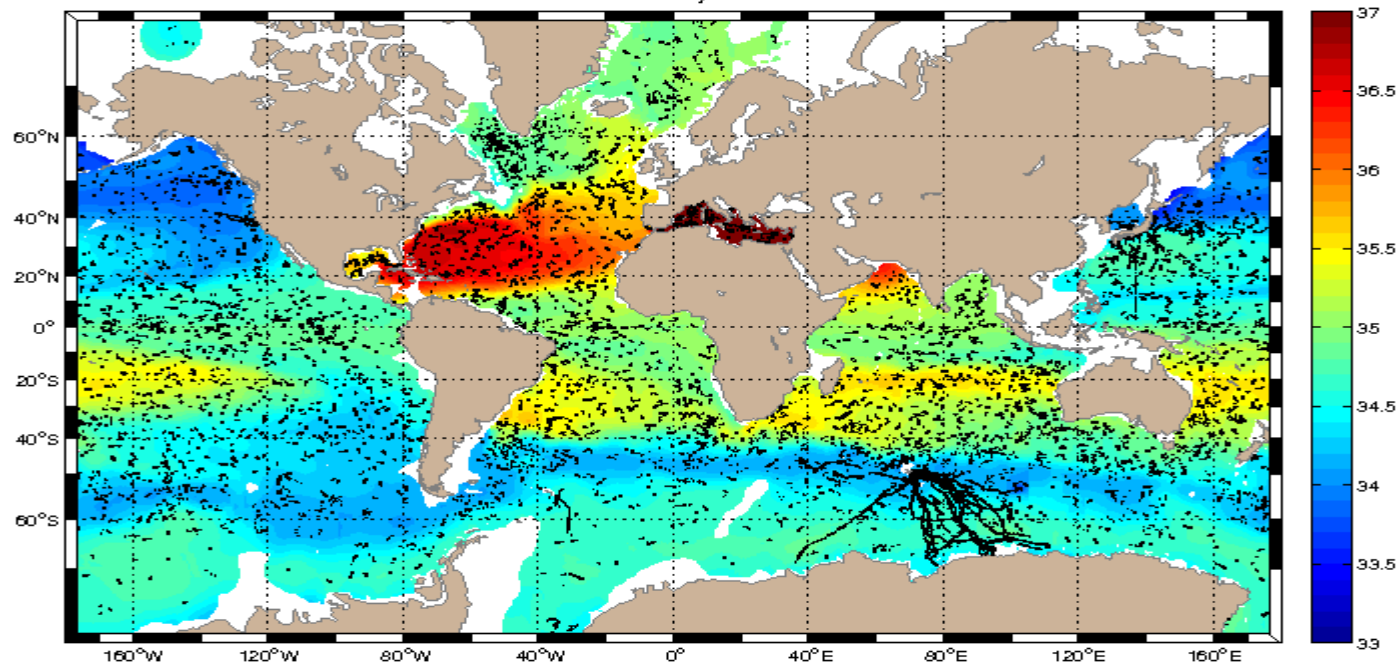
Oceany



Coriolis

Min: 5.00 Max: 40.55 Count: 18178 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations objec

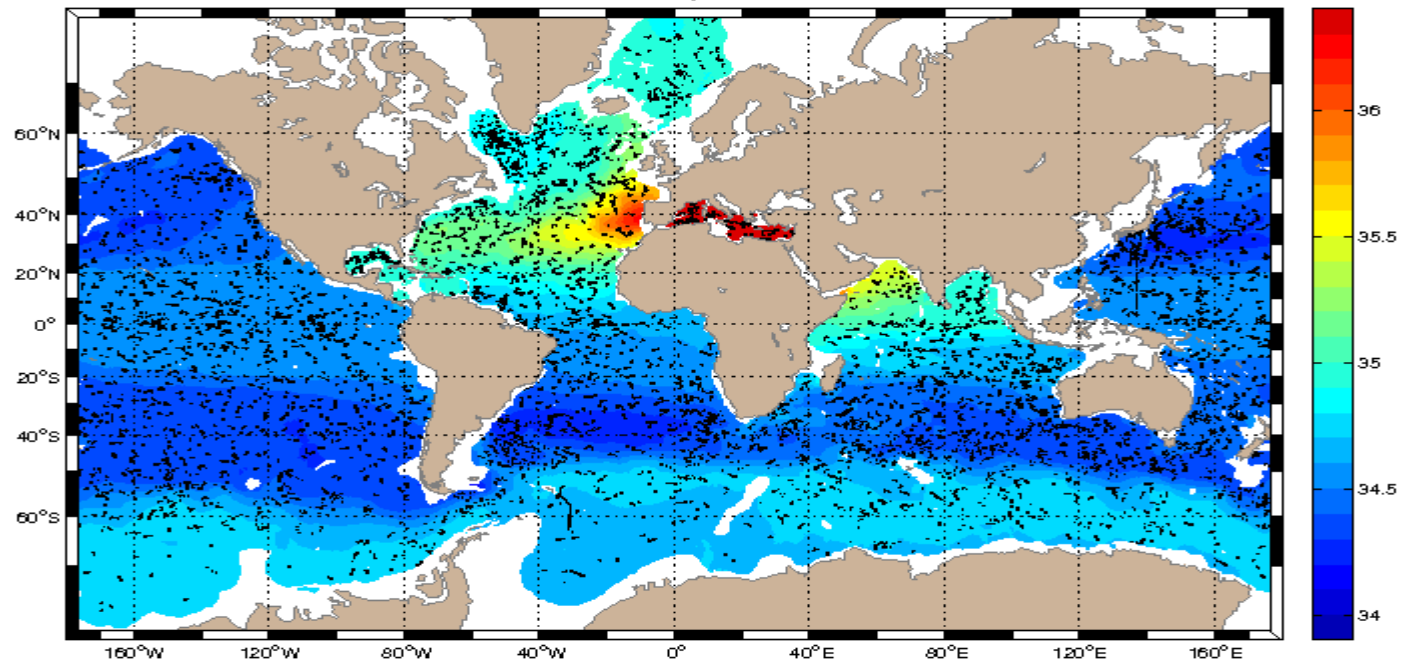
PSAL – 27 February 2021 – 300 m



Coriolis

Min: 21.62 Max: 40.75 Count: 17183 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

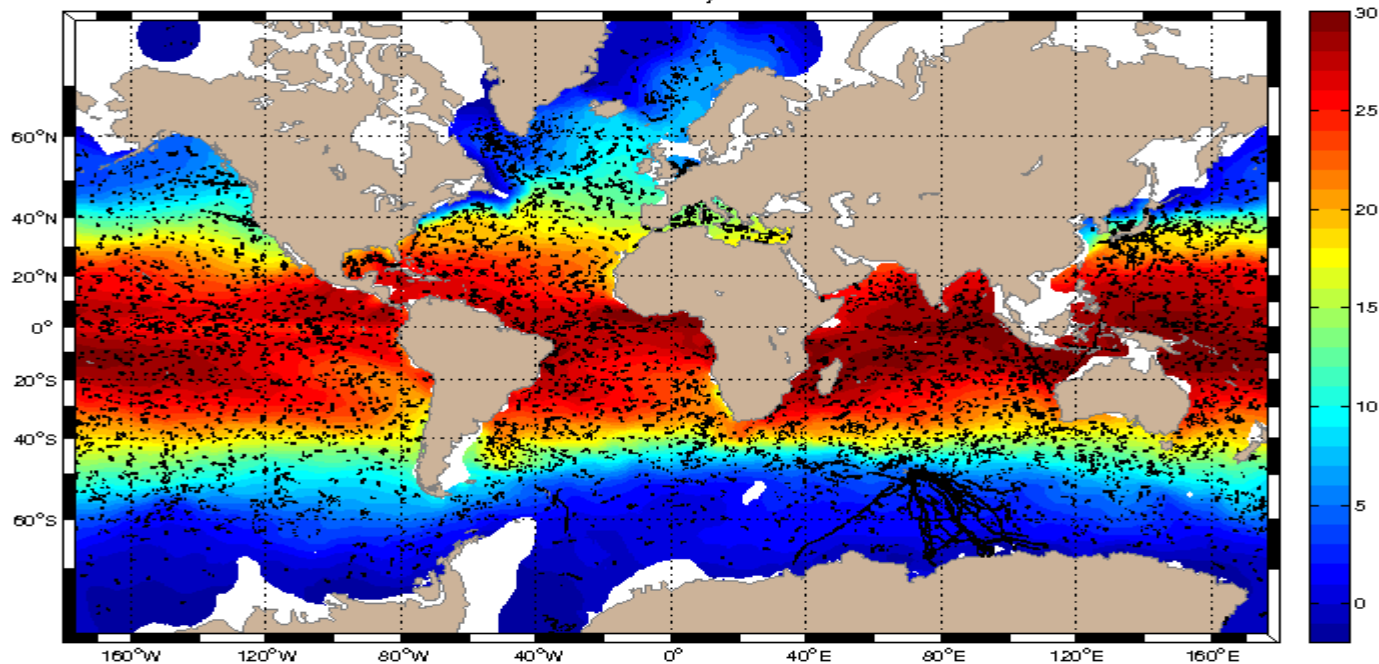
PSAL – 27 February 2021 – 1000 m



Coriolis

Min: 22.24 Max: 40.80 Count: 13139 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

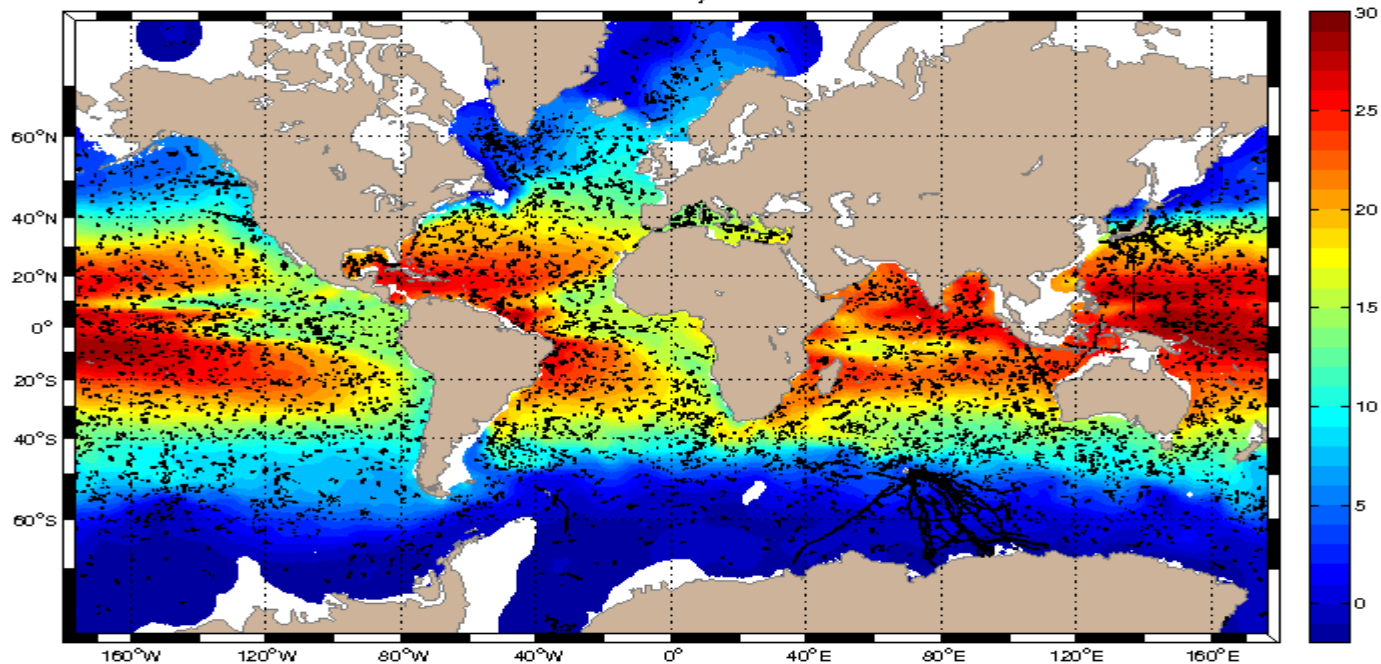
TEMP - 27 February 2021 - 10 m



Coriolis

Min: -2.50 Max: 30.86 Count: 20732 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

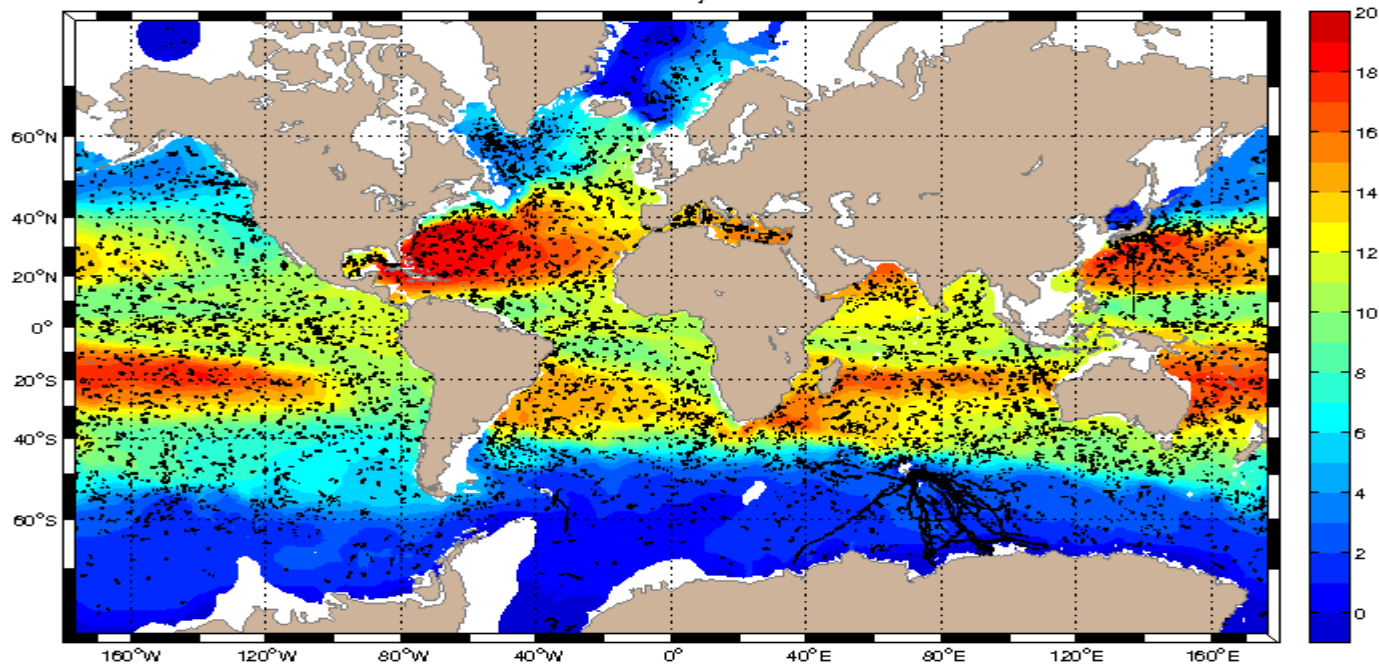
TEMP - 27 February 2021 - 100 m



Coriolis

Min: -2.41 Max: 29.14 Count: 20526 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

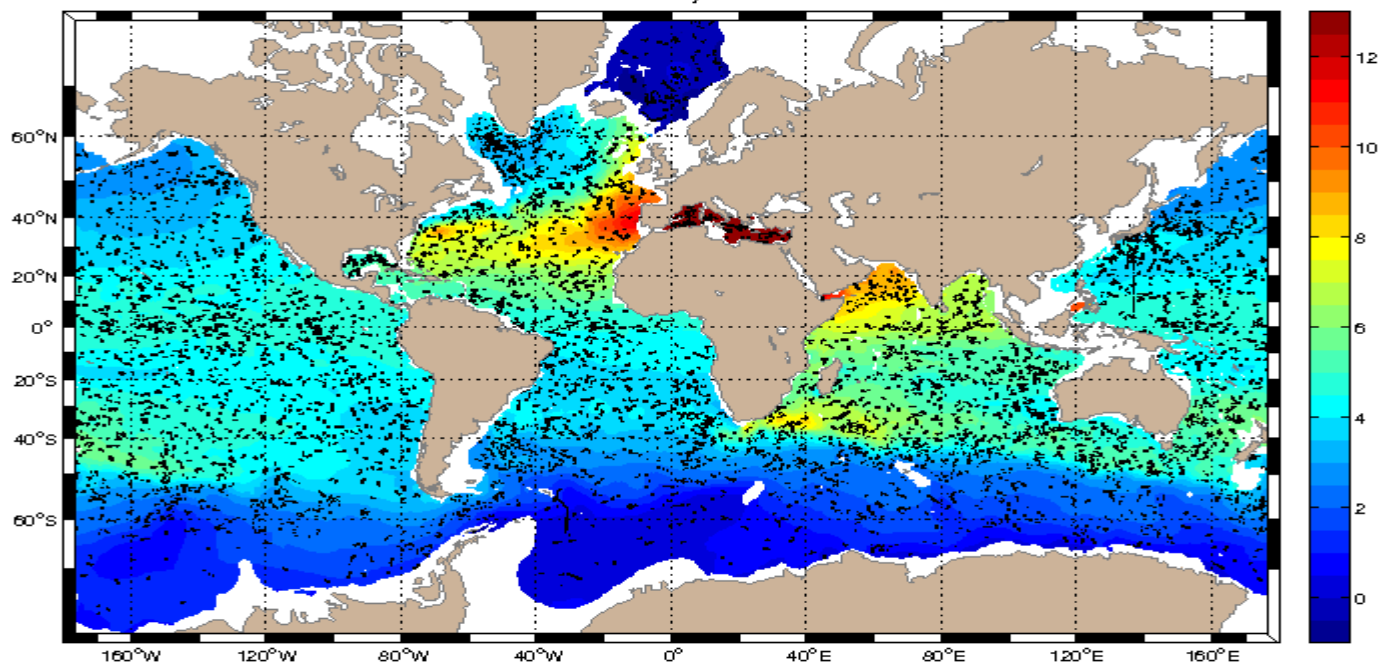
TEMP - 27 February 2021 - 300 m



Coriolis

Min: -2.52 Max: 21.77 Count: 19689 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

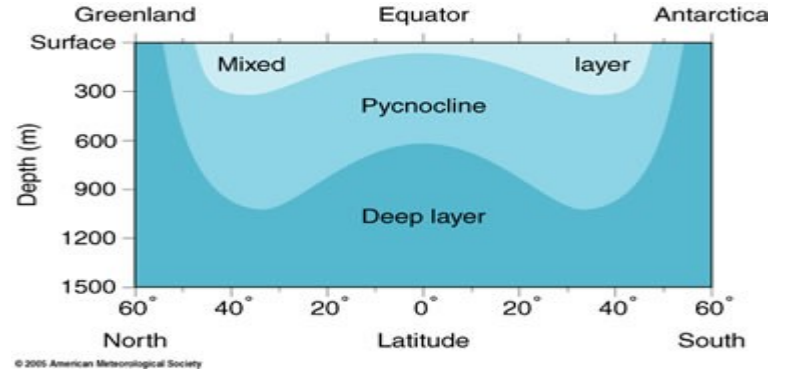
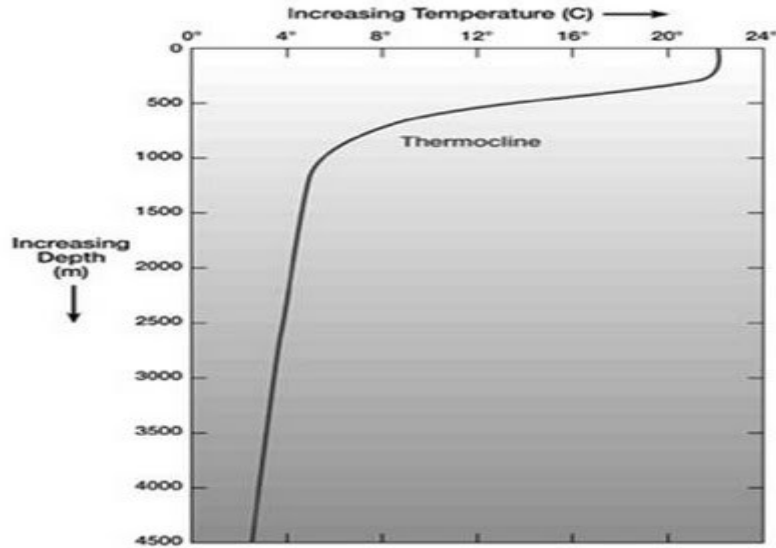
TEMP - 27 February 2021 - 1000 m



Coriolis

Min: -1.95 Max: 21.70 Count: 15247 Error Max: 95 % Date update: 27/02/2021 ISAS 6.2 Global Ocean near real time in-situ observations obje

Struktura pionowa oceanów



- warstwa mieszania
- warstwa przejściowa – termoklina
- głębia oceaniczna

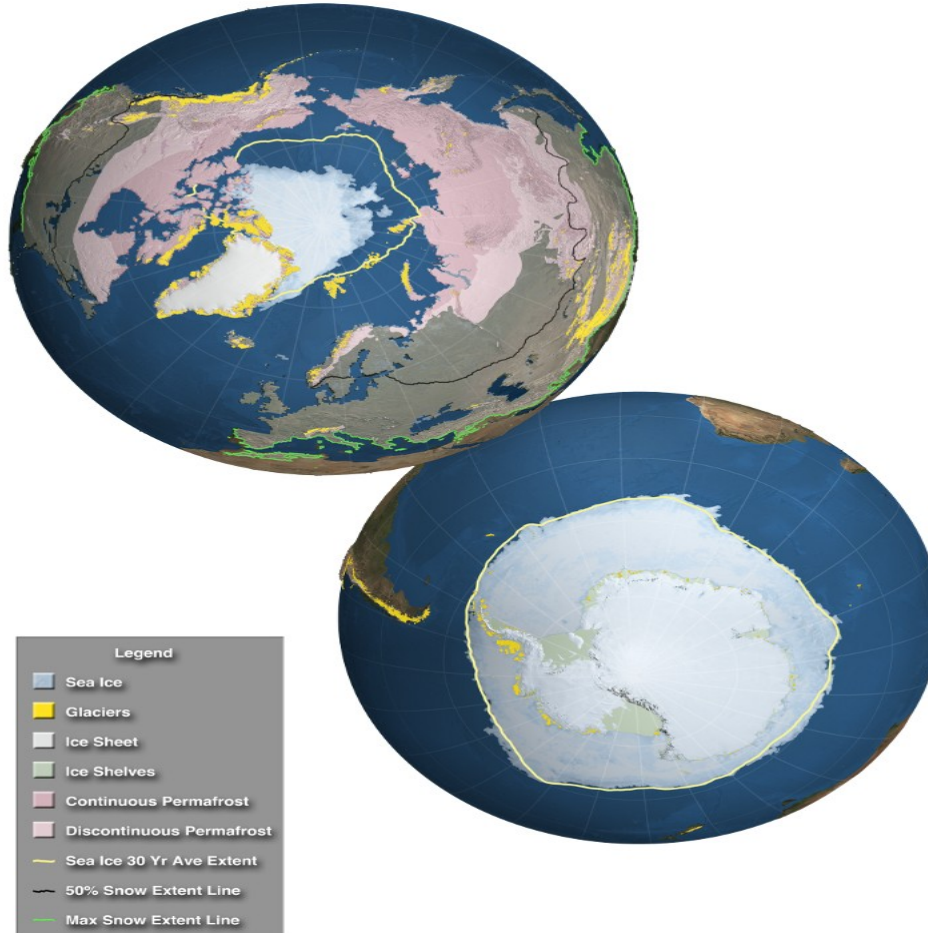
Interakcje pomiędzy atmosferą a oceanem

Wymiana:

- pary wodnej
- dwutlenku węgla
- soli morskiej
(produkcja aerozolu
morskiego)
- energii
- pędu



Kriosfera

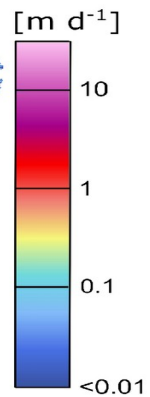


2014/15

2015/16

2016/17

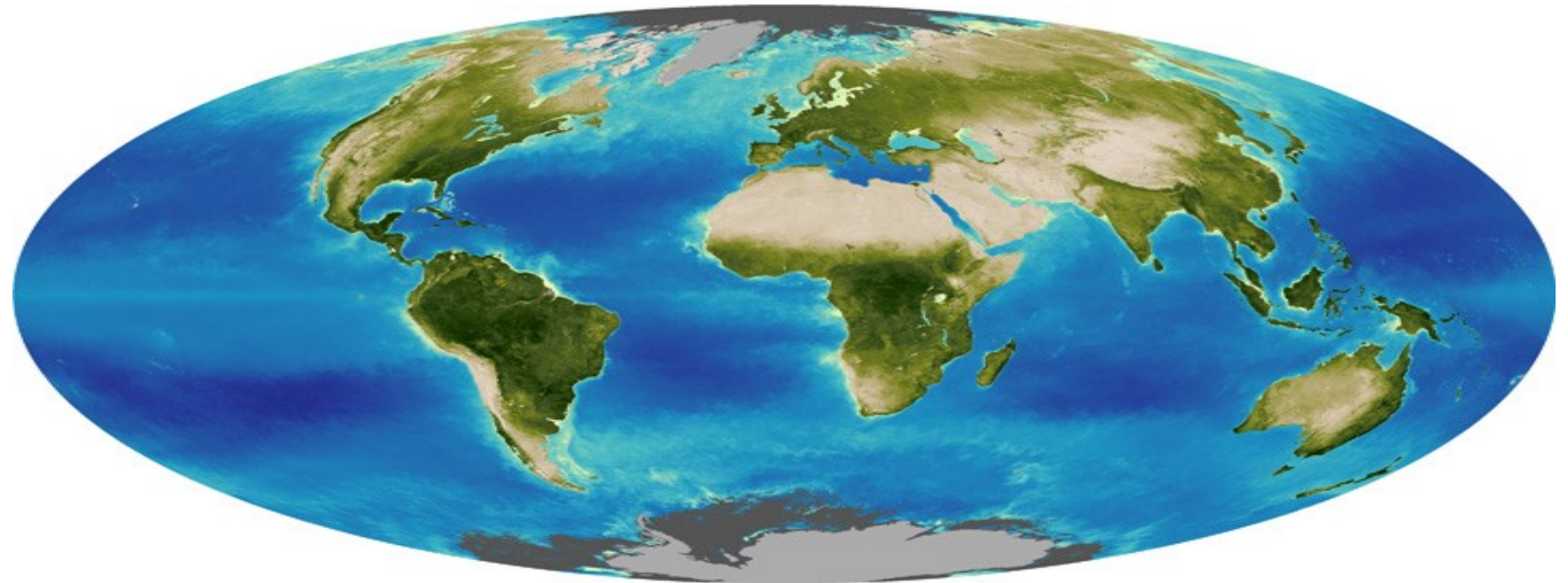
2017/18



Rola kriosfery w systemie klimatycznym

- wpływa na bilans energii (wysokie albedo śniegu i lodu)
- wpływa na poziom światowego oceanu
- wpływa na cyrkulację oceaniczną w wysokich szerokościach geograficznych i nie tylko
- bierze udział w szeregu sprzężeń zwrotnych w systemie klimatycznym

Biosfera



Chlorophyll Concentration (mg/m³)

Vegetation Index

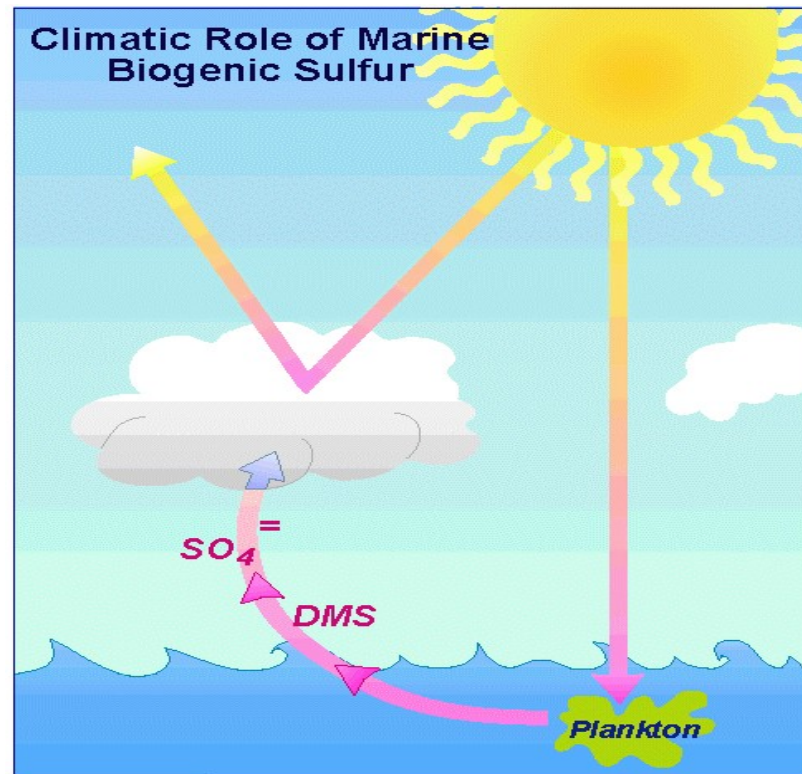
0.01 0.1 1 10 50

0.2 0.4 0.6 0.8

Rola biosfery w systemie klimatycznym

- Obieg węgla, produktywności biosfery
- Wpływ na bilans energii, wymianę pary wodnej (transpiracja)
- Emisja DMS i innych prekursorów aerozoli

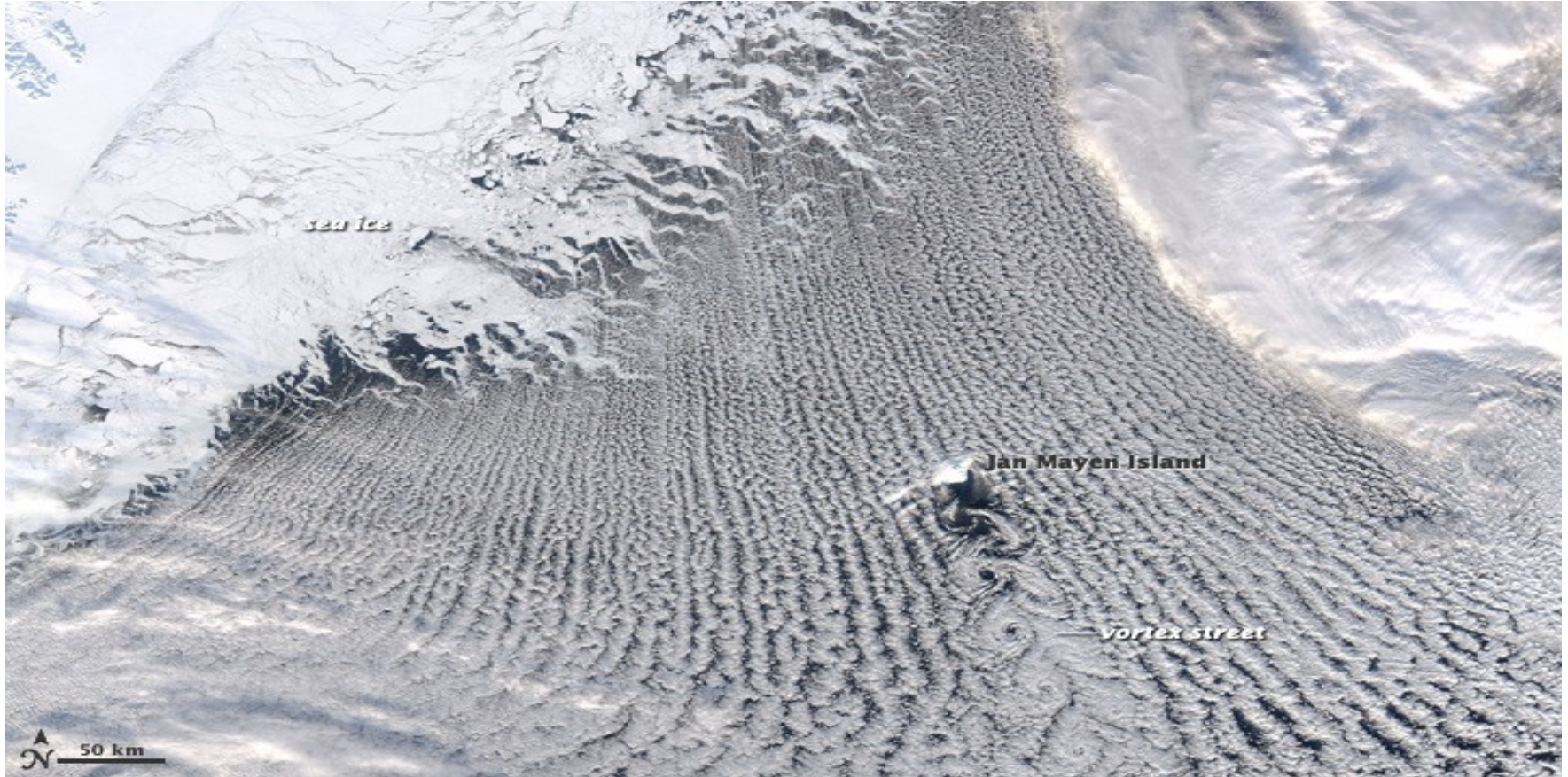
Charlson et al. (*Nature*, 326:655-661, 1987)



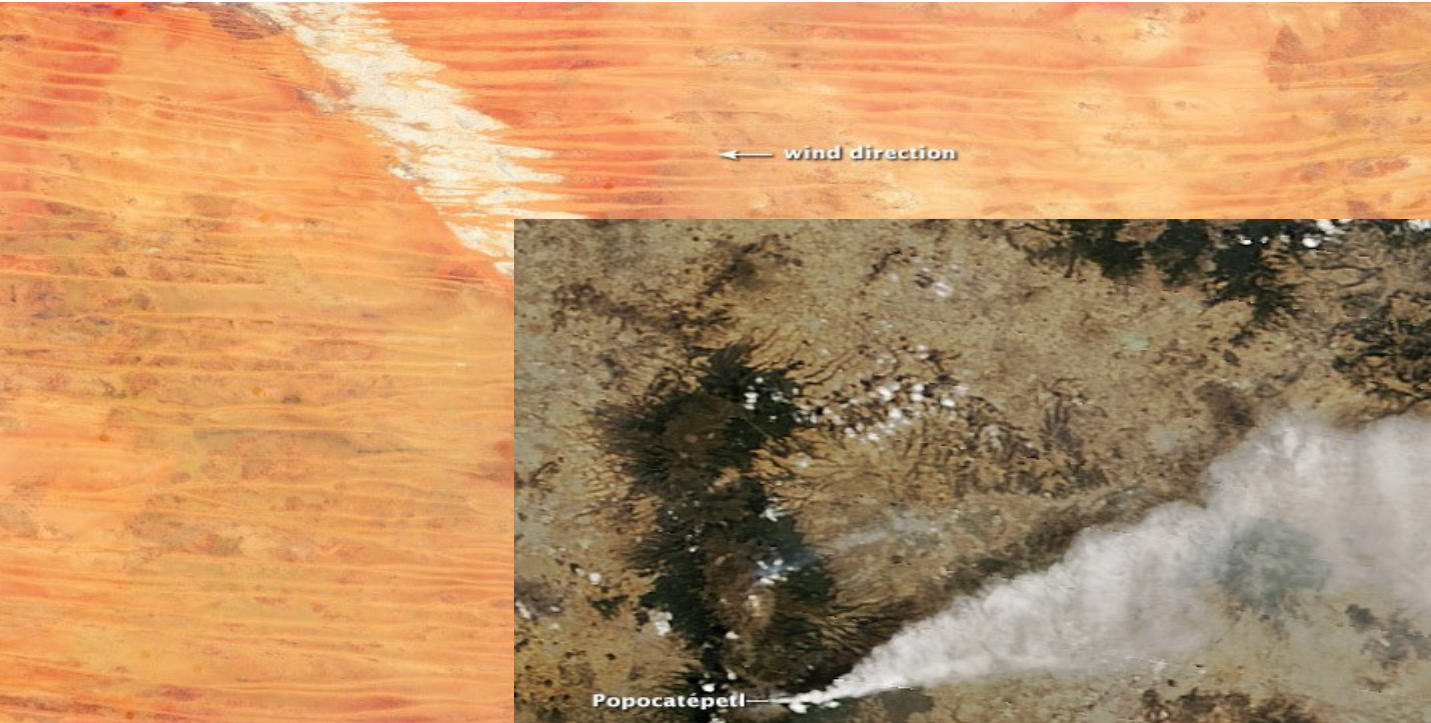
Litosfera

- zewnętrzna sztywna powłoka Ziemi obejmująca skorupę ziemską i warstwę perydotytową zaliczaną do górnej części płaszcza ziemskiego.
- miąższość litosfery wynosi od ok. 10-100 km a jej temperatura dochodzi do 700°C.
- wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje litosfery: kontynentalną i oceaniczną.

Rola litosfery w systemie klimatycznym

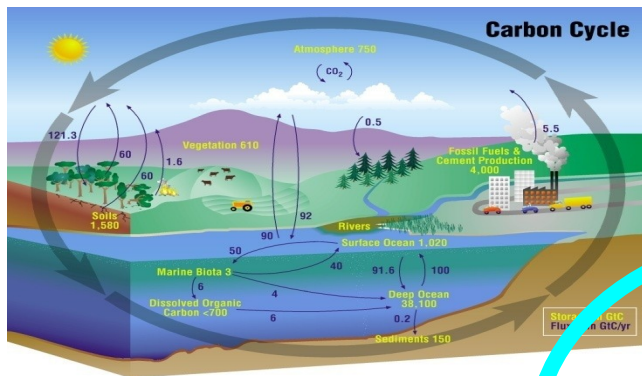


Rola litosfery w systemie klimatycznym

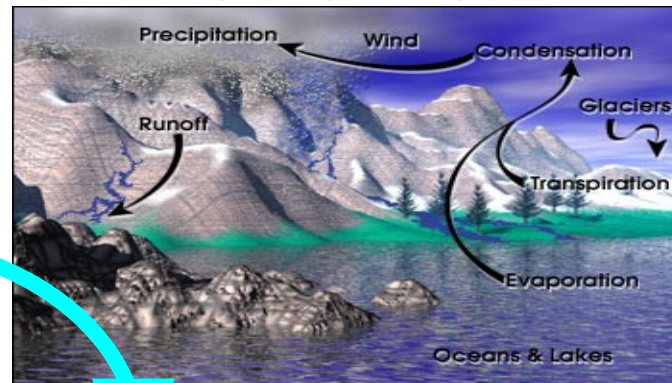


Procesy w systemie klimatycznym

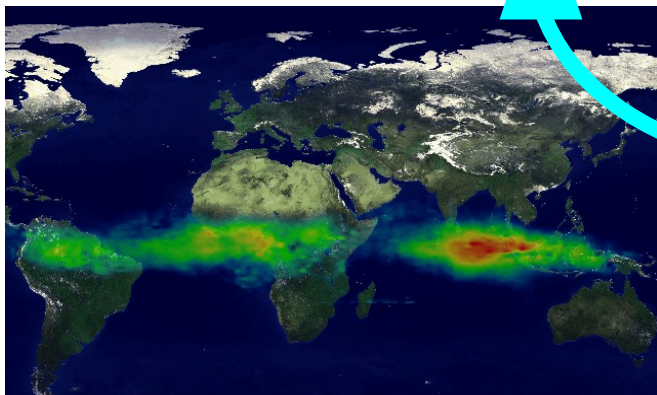
Obieg węgla



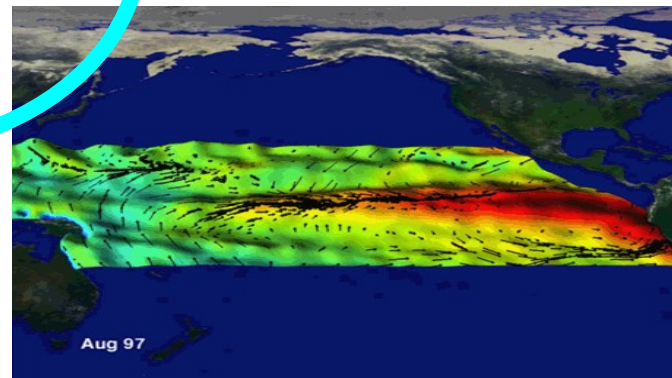
Obieg wody i energii

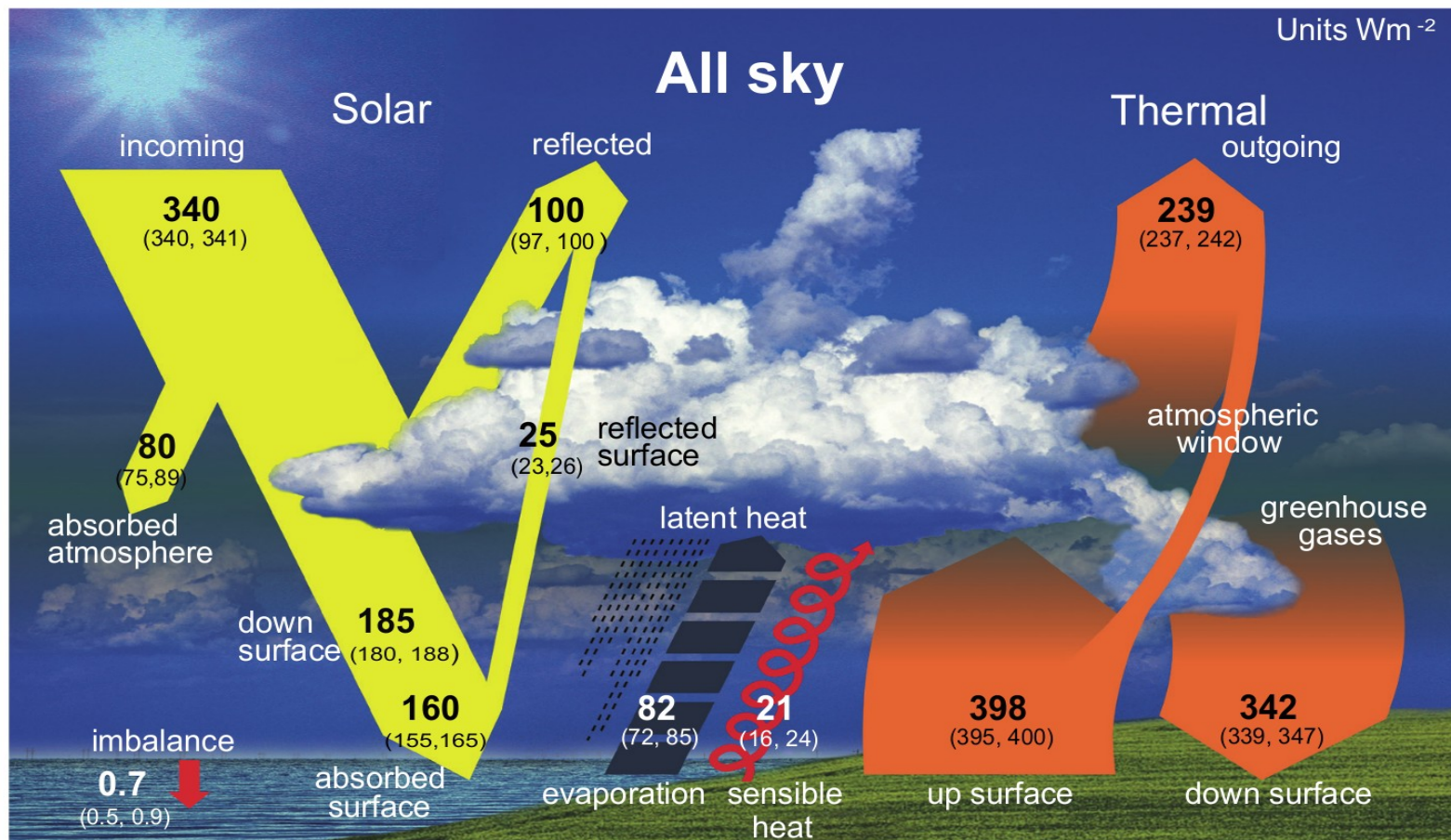


Reakcje chemiczne w atmosferze



Dynamika atmosfery i oceanu



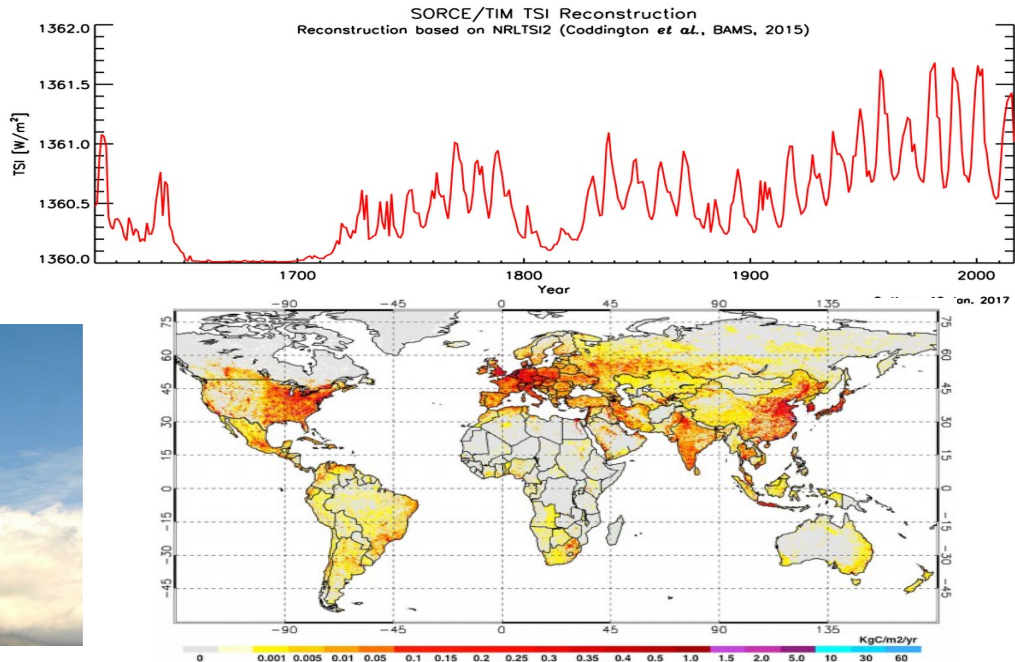
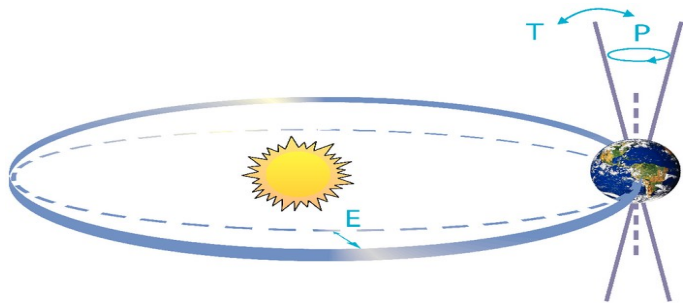


<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

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

Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym.

Wymuszenia inicjują zmiany klimatu.

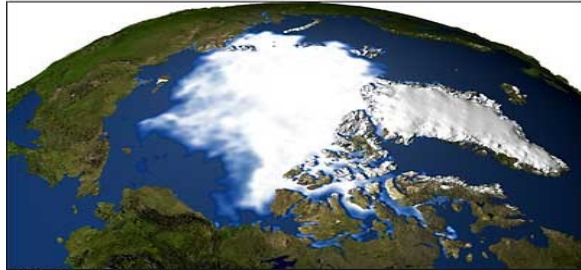


Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym.

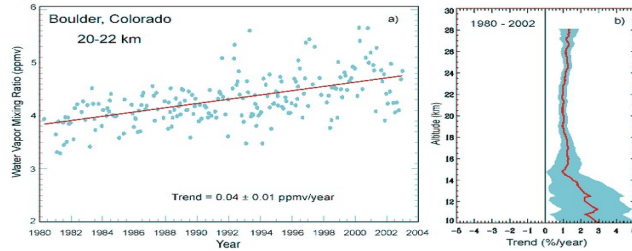
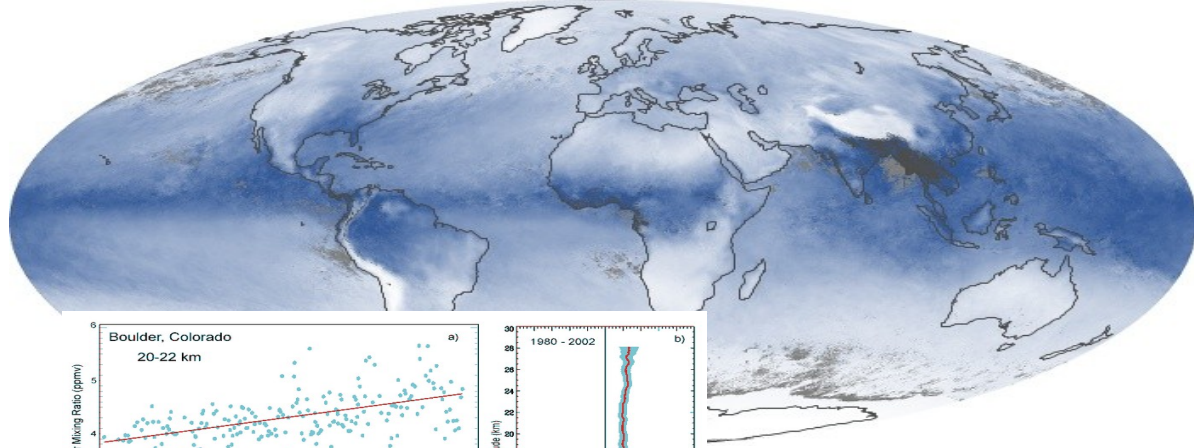
Sprzężenia to procesy zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego, które skutkują dalszymi zmianami klimatu.



1979 SSM/I Composite Data



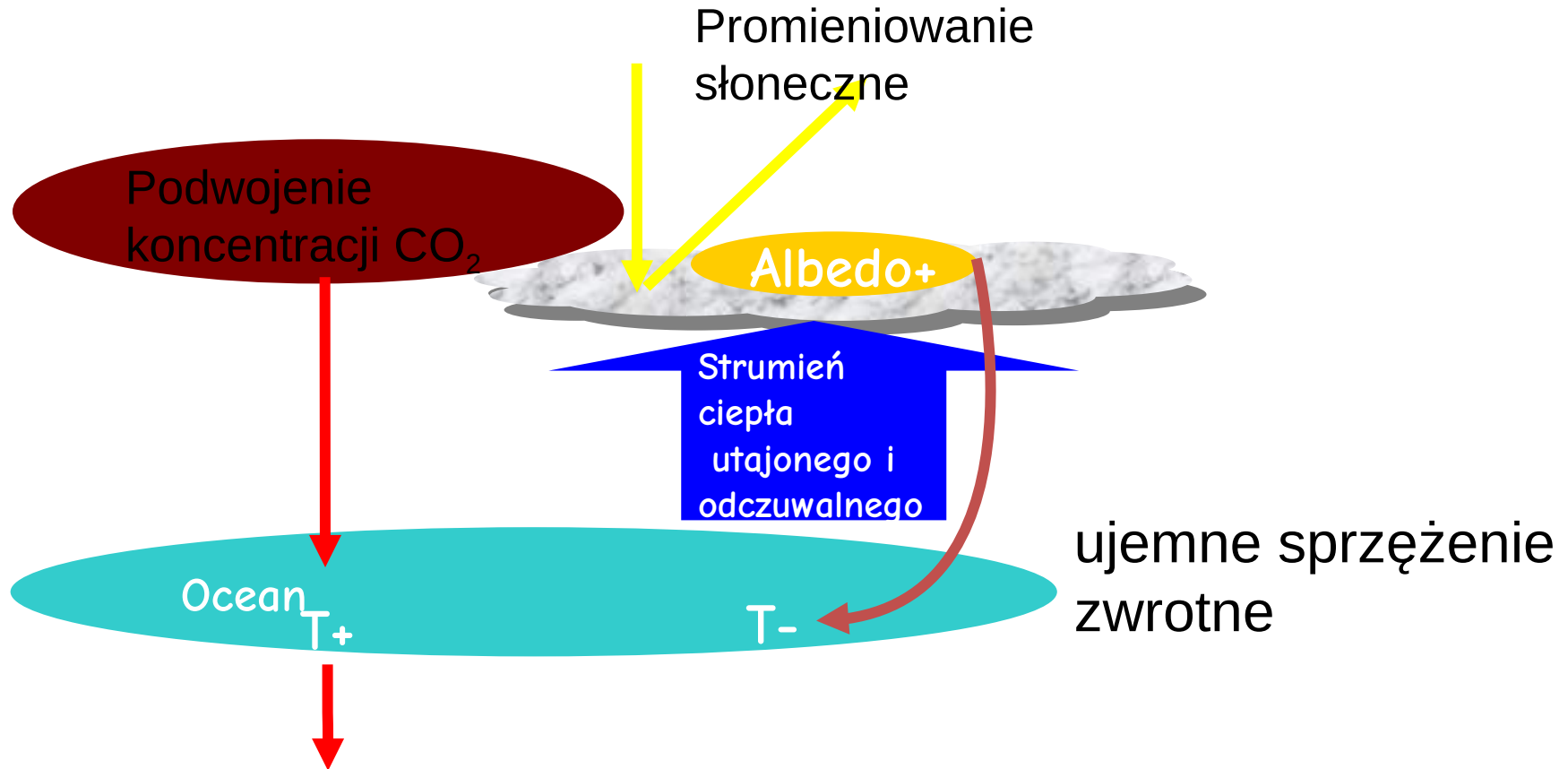
2003 SSM/I Composite Data



Temperatura na powierzchni Ziemi zależy od dostawy energii od Słońca
i ucieczki energii w kosmos ΔQ_s
 ΔQ_c



Przykład sprzężenia zwrotnego w systemie klimatycznym Ziemi-Atmosfera



Badania klimatu

monitoring
zmienności

wymuszanie

odpowiedź

konsekwencje

predykcja

