

# Przyczyny i skutki gwałtownego ocieplania Arktyki

Krzysztof M. Markowicz

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki UW

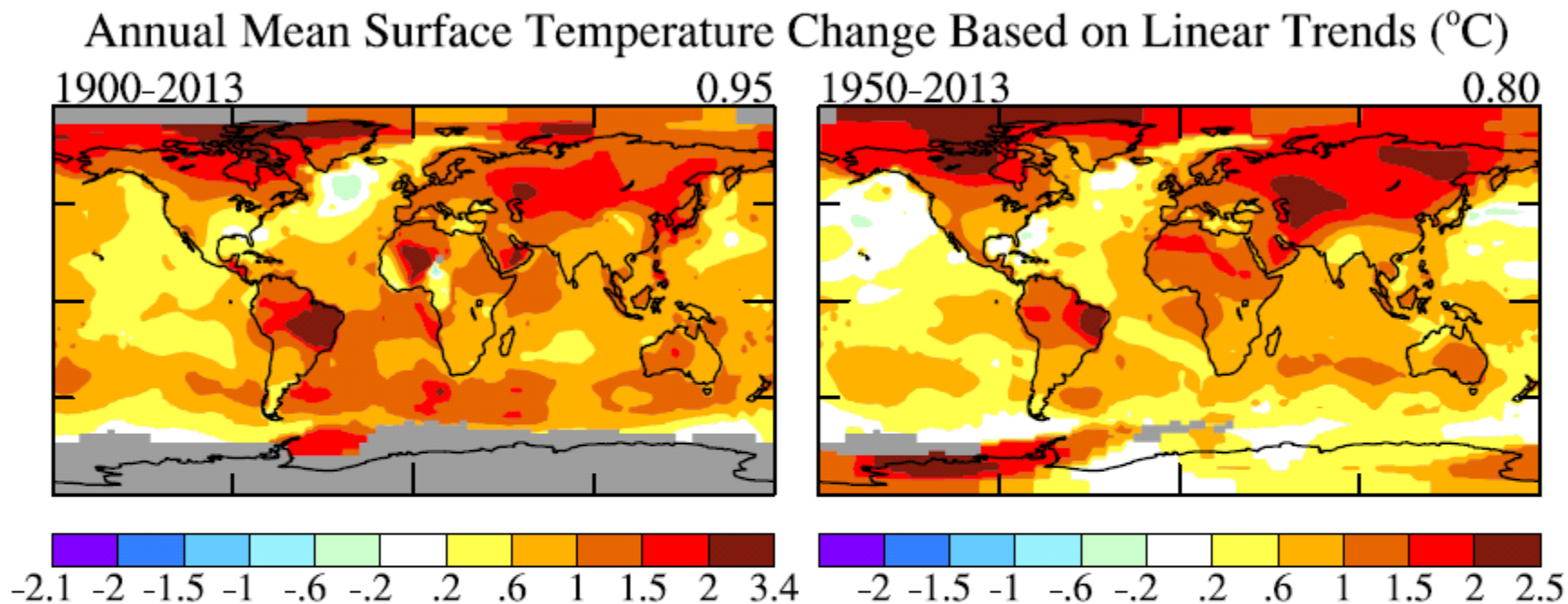
[kmark@igf.fuw.edu.pl](mailto:kmark@igf.fuw.edu.pl)



# Plan wykładu

- Co wiemy o zmianach klimatu w Arktyce
- Arktyczny system klimatyczny
- Dlaczego badania klimatu w Arktyce są ważne?
- Smog arktyczny i jego wpływ na klimat
- Oddziaływanie Arktyki na umiarkowane szerokości geograficzne

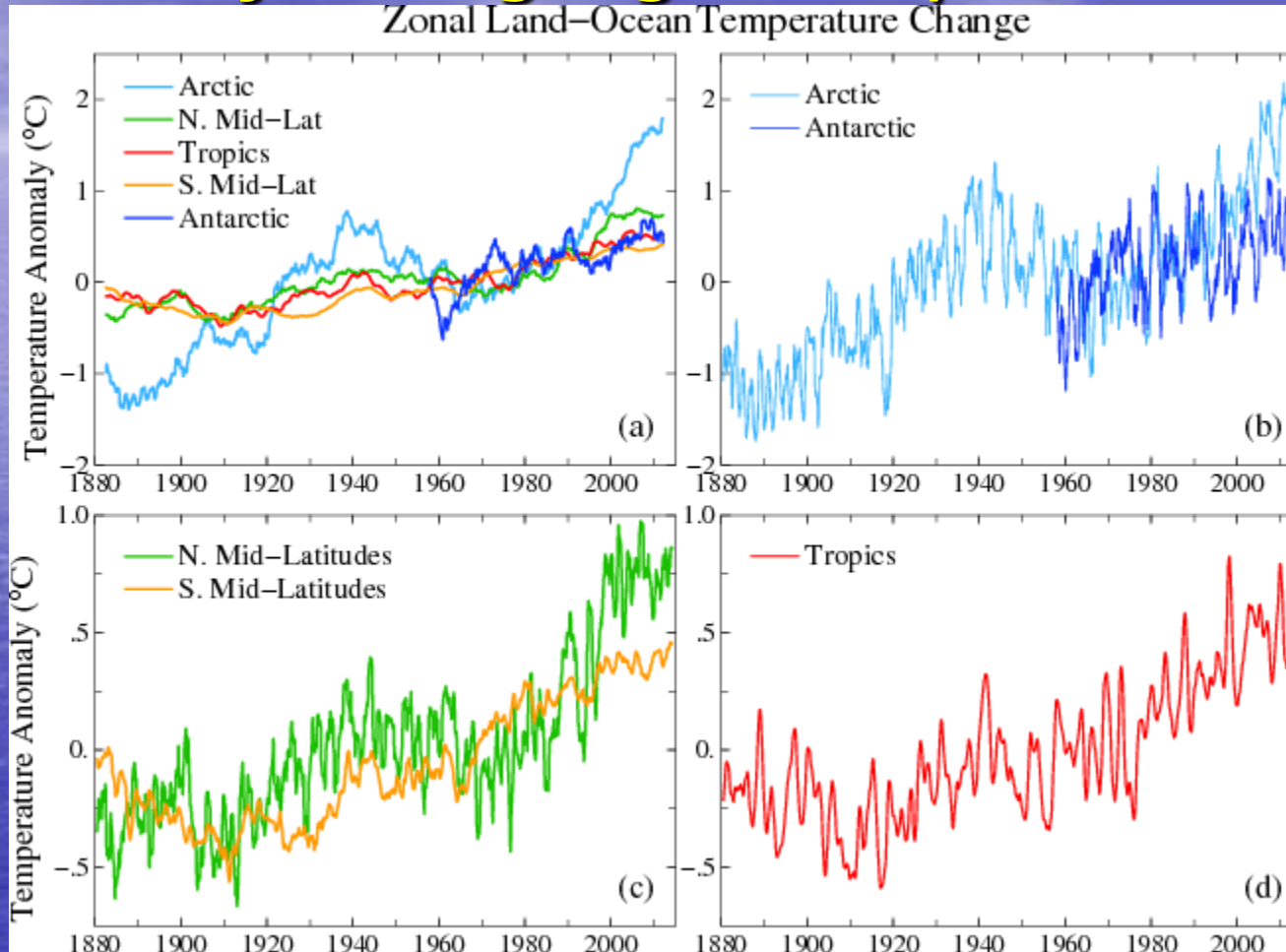
# Zmiany klimatu w Arktyce na tle zmian globalnych



IPCC, 2013



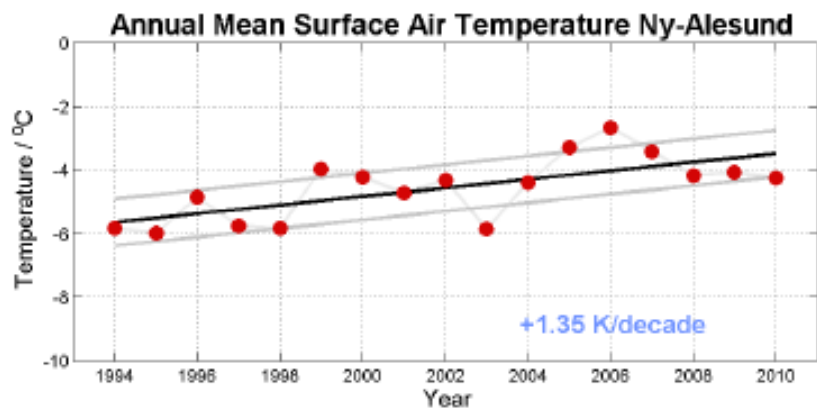
# Zmiany temperatury Arktyki na tle innych rejonów geograficznych.



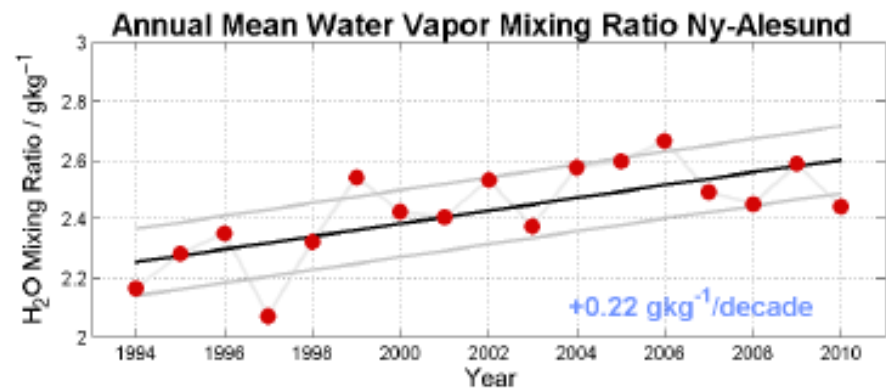
University of Columbia GISTEMP data



# Zmiany temperatury na Spitsbergenie Ny-Alesund



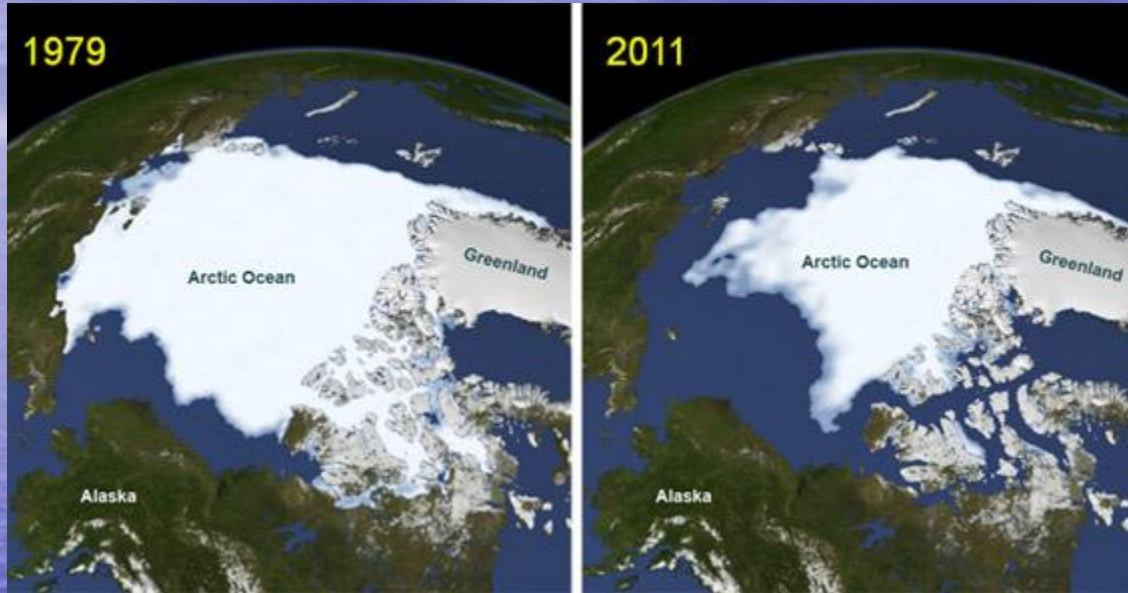
**Figure 8.** Annual mean of the 2 m surface air temperature in Ny-Ålesund from 1994 to 2010 (red dots), with the linear regression  $\pm 1$  standard deviation (black and grey lines, respectively) giving a temperature increase of  $+1.35 \text{ K}$  per decade.



**Figure 9.** Annual mean of the H<sub>2</sub>O mixing ratio in Ny-Ålesund from 1994 to 2010 (red dots), with the linear regression  $\pm 1$  standard deviation (black and grey lines, respectively) giving a humidity increase of  $+0.22 \text{ g kg}^{-1}$  per decade.

Maturilli et al., 2013

# Zmiany w kriosferze



Zasięg pokrywy lodowej w Arktyce podczas minimum wrześniowego w 1979 oraz 2011 (NASA)



# Zmiany grubości arktycznego lodu na podstawie pomiarów z altymetrii satelitarnej.

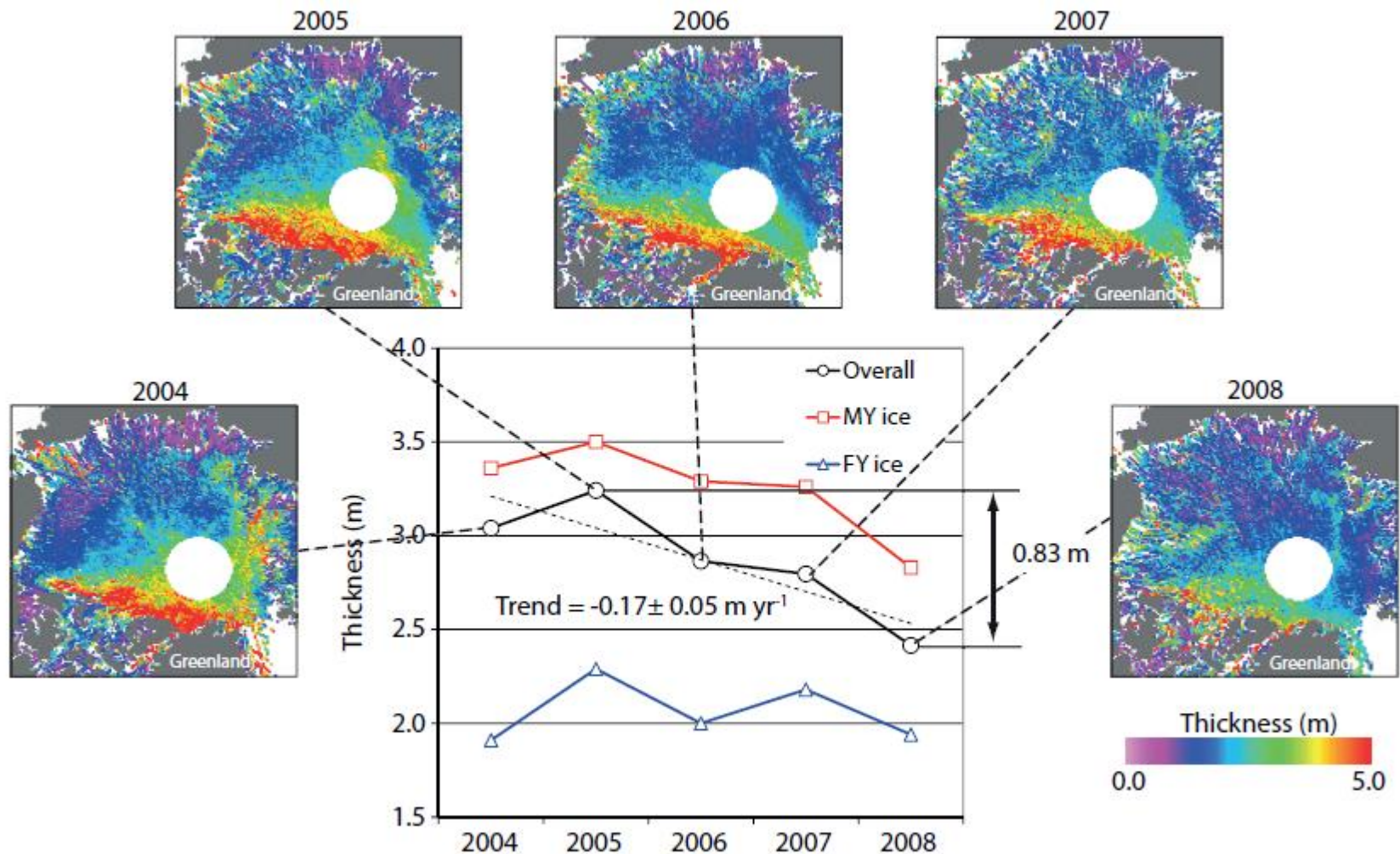
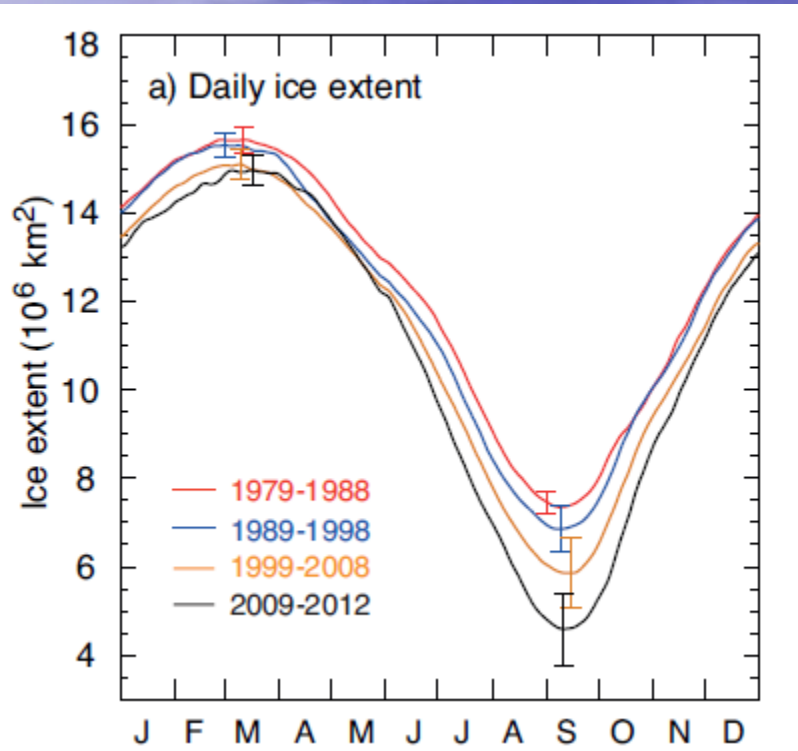


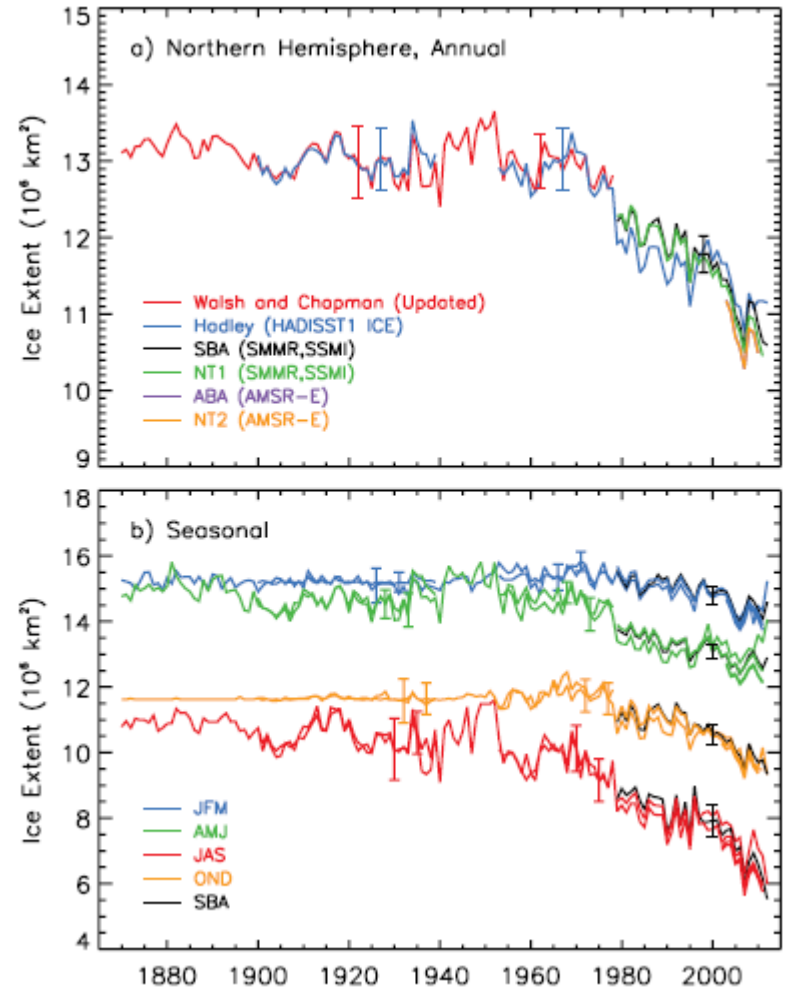
Figure 4.5 | The distribution of winter sea ice thickness in the Arctic and the trends in average, first-year (FY) and multi-year (MY) ice thickness derived from ICESat data between 2004 and 2008 (Kwok, 2009).



# Zmiany zasięgu lodu w Arktyce

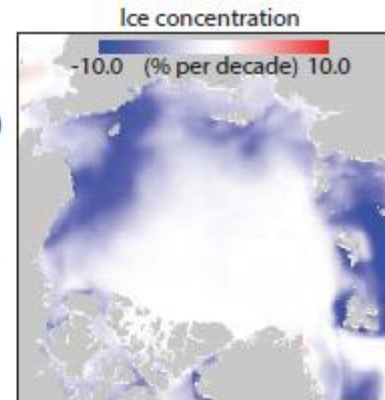
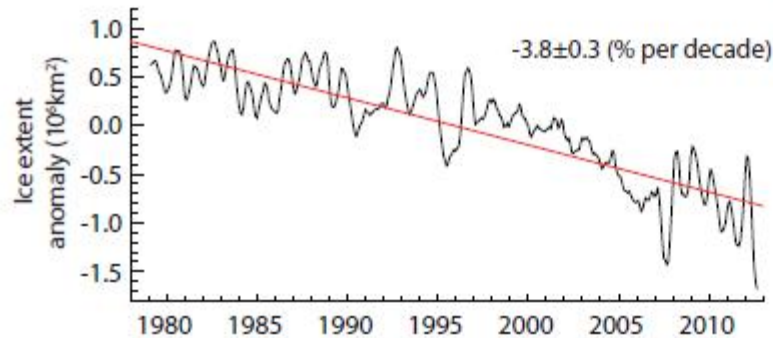


IPCC, 2013

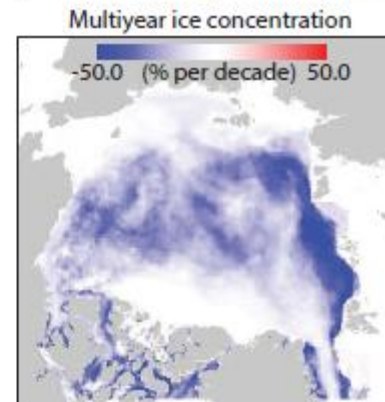
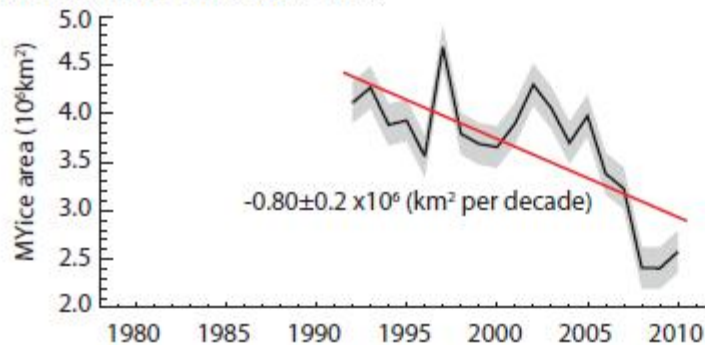


# Trendy czasowe zmian w kriosferze

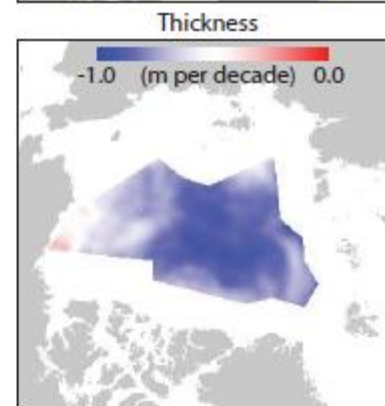
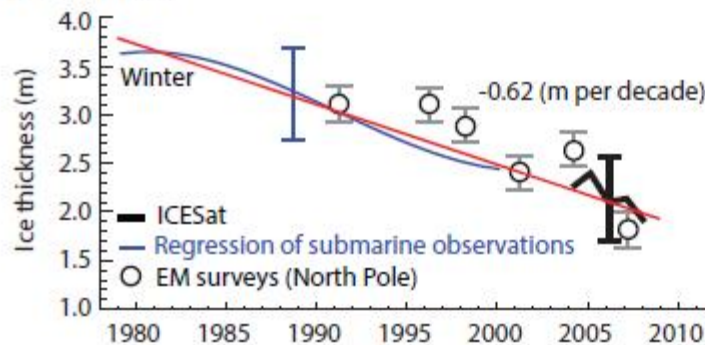
a) Annual ice extent



b) Multiyear ice coverage (Jan-1)

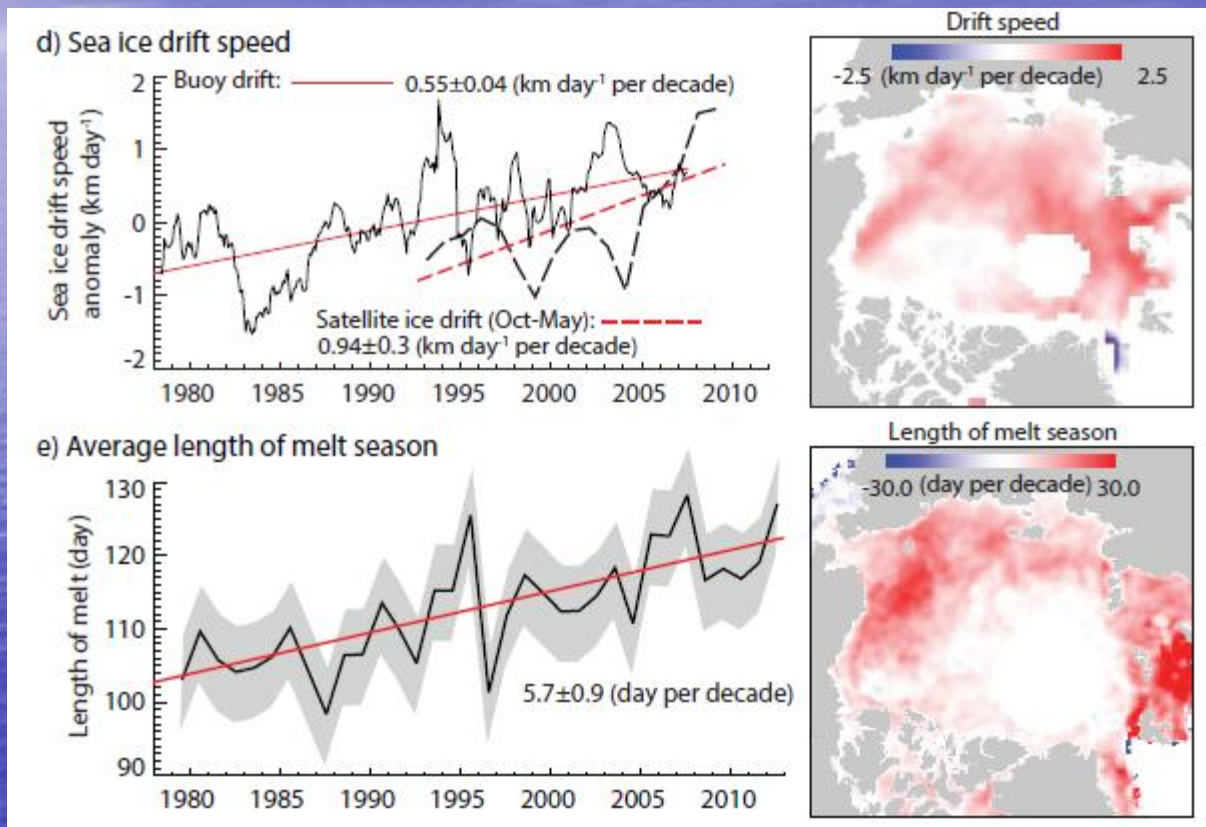


c) Ice thickness





# Zmiany czasowe prędkości dryfu lodu morskiego oraz długości trwania okresu topnienia.

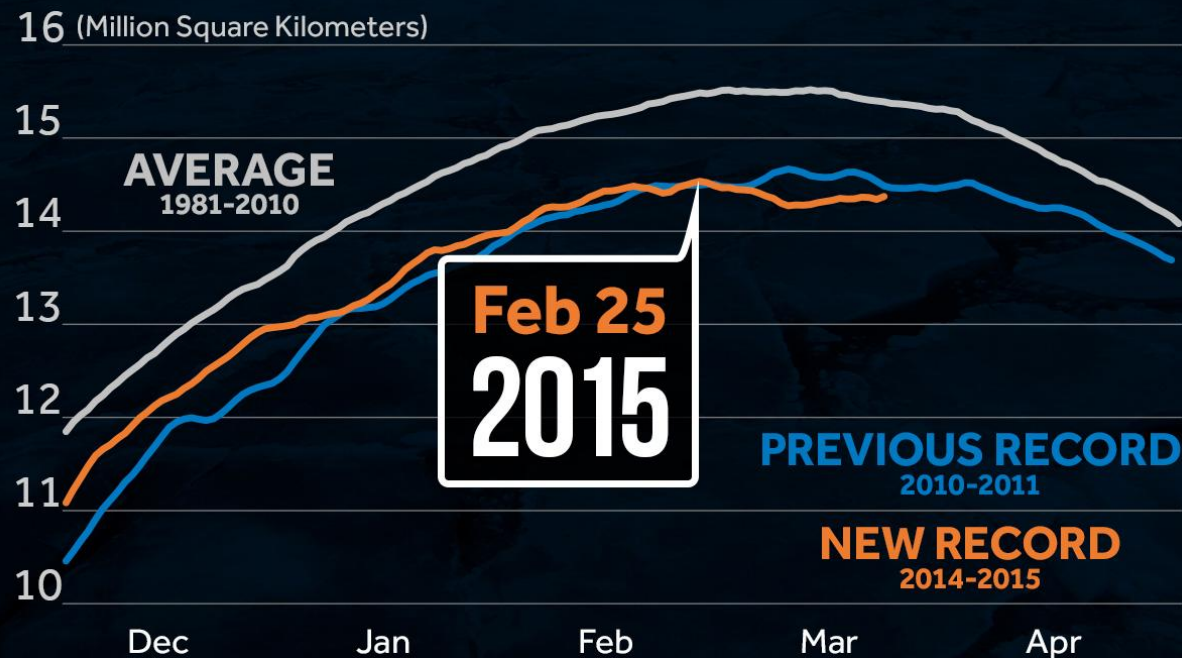


**Figure 4.6** | Summary of linear decadal trends (red lines) and pattern of changes in the following: (a) Anomalies in Arctic sea ice extent from satellite passive microwave observations (Comiso and Nishio, 2008, updated to include 2012). Uncertainties are discussed in the text. (b) Multi-year sea ice coverage on January 1st from analysis of the QuikSCAT time series (Kwok, 2009); grey band shows uncertainty in the retrieval. (c) Sea ice thickness from submarine (blue), satellites (black) (Kwok and Rothrock, 2009), and *in situ*/electromagnetic (EM) surveys (circles) (Haas et al., 2008); trend in submarine ice thickness is from multiple regression of available observations within the data release area (Rothrock et al., 2008). Error bars show uncertainties in observations. (d) Anomalies in buoy (Rampal et al., 2009) and satellite-derived sea ice drift speed (Spren et al., 2011). (e) Length of melt season (updated from Markus et al., 2009); grey band shows the basin-wide variability.



# Lodu ubywa również zimą

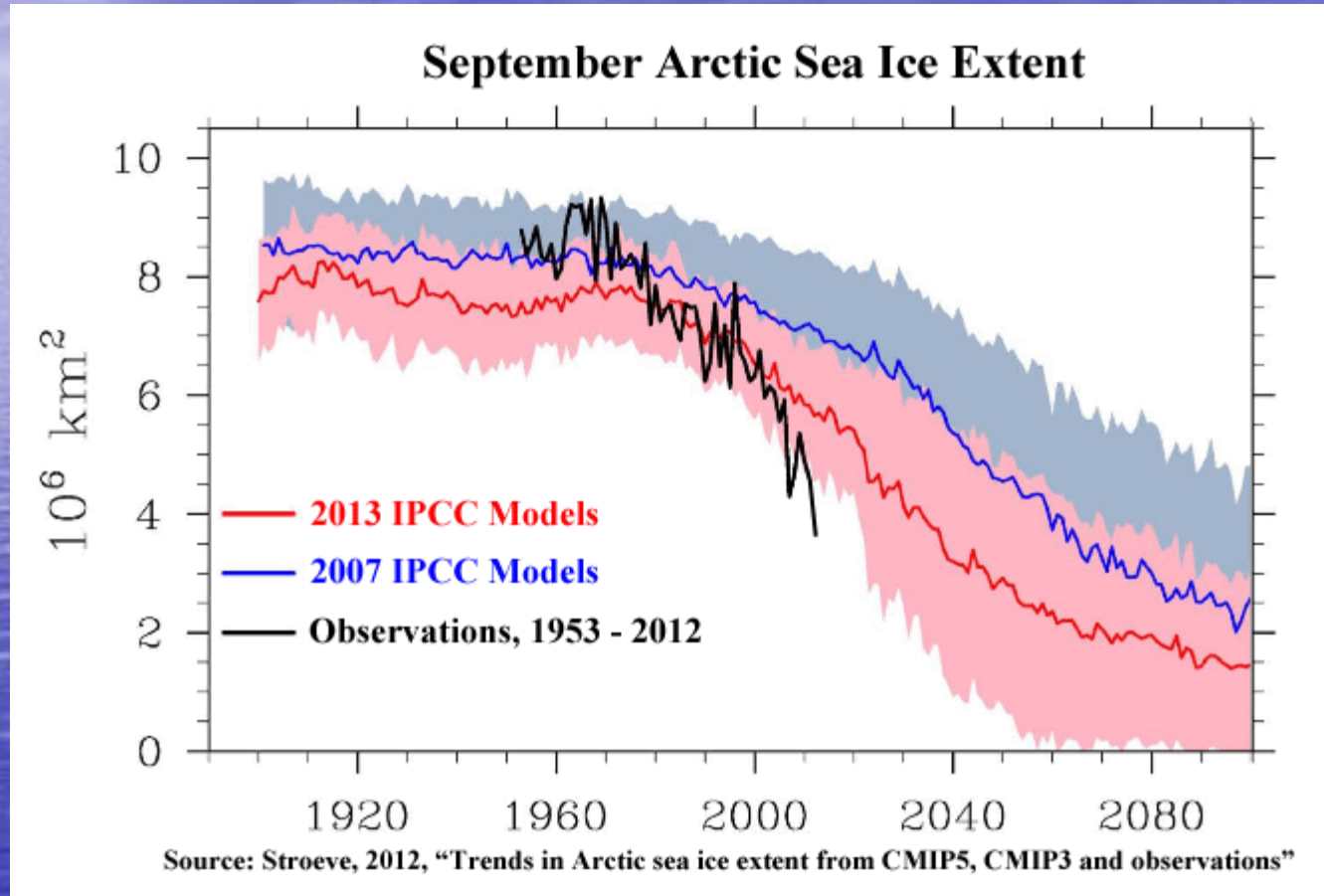
## Arctic Sea Ice: Record Low Maximum



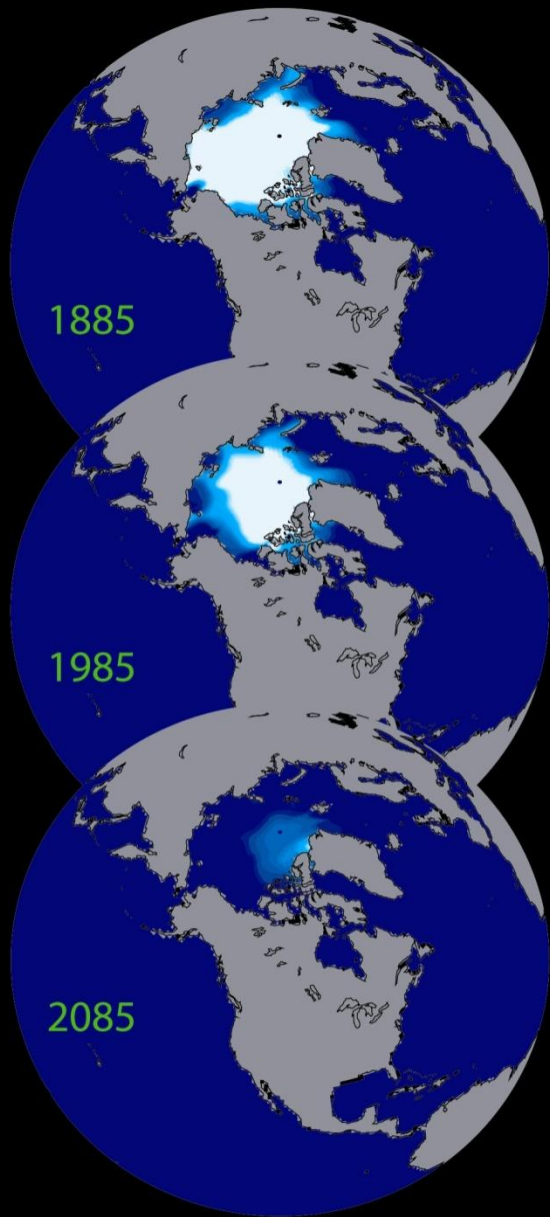
Area of Ocean with at Least 15% Ice.  
Source: National Snow and Ice Data Center

CLIMATE  CENTRAL

# Redukcja pokrywy lodowej – porównanie modeli i obserwacji







1885

1985

2085



Aug Sept Oct Avg Sea Ice Concentration

# Symulacja na przyszłość



# Arktyczny system klimatyczny

- Wykazuje największą dynamikę w kontekście obserwowanych zmian klimatycznych
- Wrażliwy na procesy fizyczne zachodzące w niższych szerokościach geograficznych (emisje i transport zanieczyszczeń)
- Wpływa na zjawiska w skali globalnej (cyrkulacja termohalinowa czy cyrkulacja Dobsona-Browera)

# Dlaczego klimat w Arktyce się ociepla?

- Główną przyczyną jest nierównowaga w bilansie energii
- Rosnąca koncentracja gazów cieplarnianych redukuje wypromieniowanie długofalowe (termalne) ciepła w przestrzeń kosmiczną.
- W konsekwencji mamy więcej energii przychodzącej od słońca w stosunku do energii emitowanej w przestrzeń kosmiczną



# Dlaczego klimat w Arktyce ociepla się szybciej niż średnio na Ziemi - Wzmocnienie Arktyczne

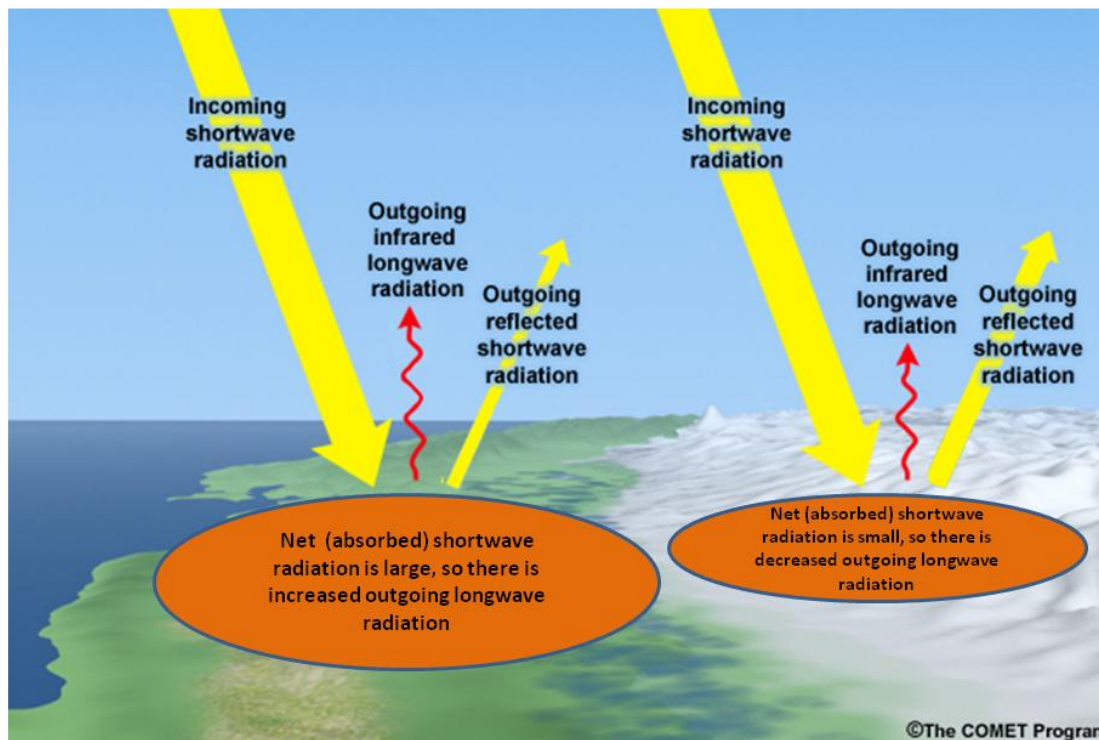
- Uważa się, że ze względu na szereg sprzężeń zwrotnych w systemie klimatycznym.
- Główne z nich to:
  - redukcja pokrywy lodowej i śnieżnej
  - związana z tym zmiana cyrkulacji oceanicznej
  - zabrudzenie lodu i śniegu poprzez cząsteczki sadzy transportowe z szerokości umiarkowanych
  - wzrost ilości pary wodnej i zachmurzenia



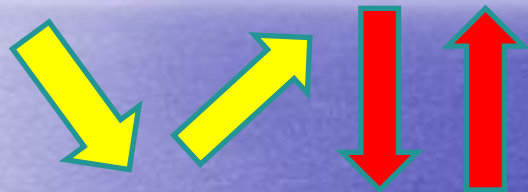
# Wpływ lodu i śniegu na bilans energii

- Istotny głównie w okresie dnia polarnego
- Lód ma wysokie ciepło topnienia i albedo oraz niskie przewodnictwo cieplne

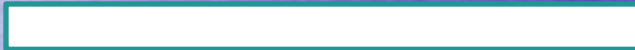
Net shortwave radiation: modified diagram from the COMET program



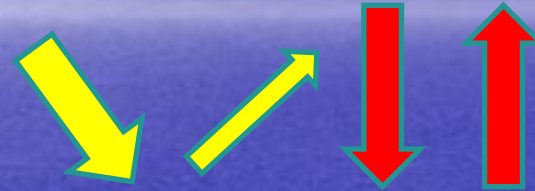
# Zmiana energii radiacyjnej związana z zanikiem pokrywy lodowej



$$A_s = 0.8$$



$$NET_s = F_{SW} - A_s \cdot F_{SW} + F_{LW} - F_{LW}$$



$$A_w = 0.1$$



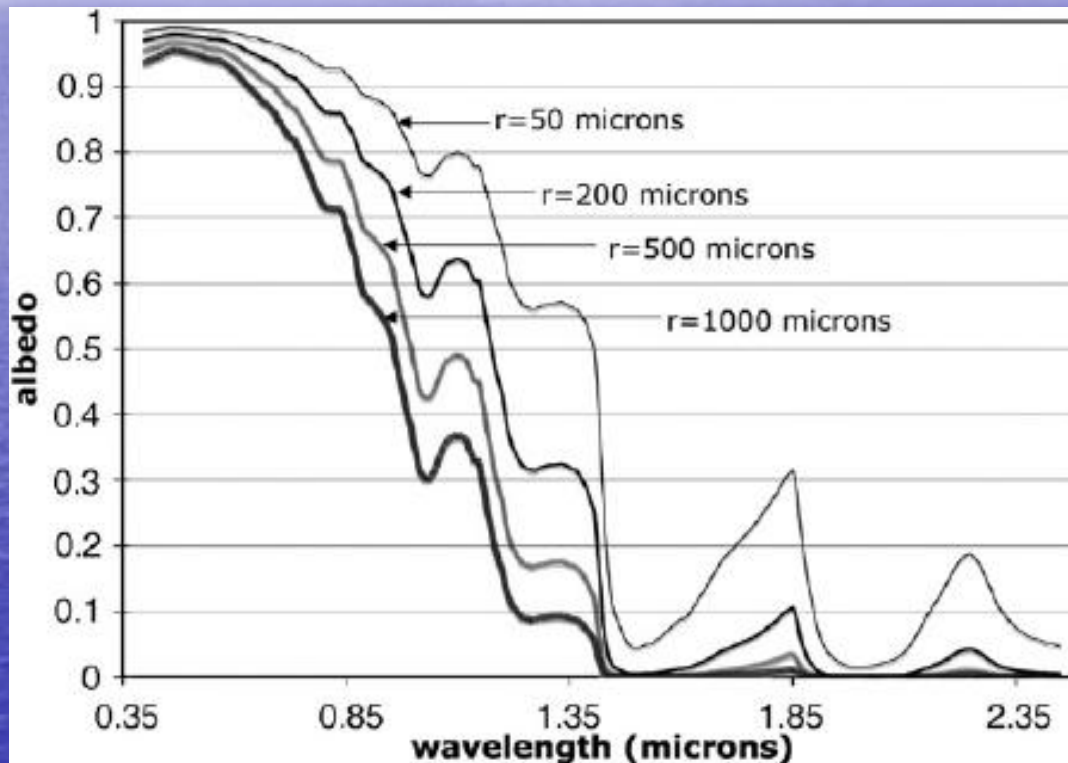
$$NET_w = F_{SW} - A_w \cdot F_{SW} + F_{LW} - F_{LW}$$

$$\Delta = NET_w - NET_s = A_s \cdot F_{SW} - A_w \cdot F_{SW} = F_{SW} (A_s - A_w) = F_{SW} \cdot 0.7$$

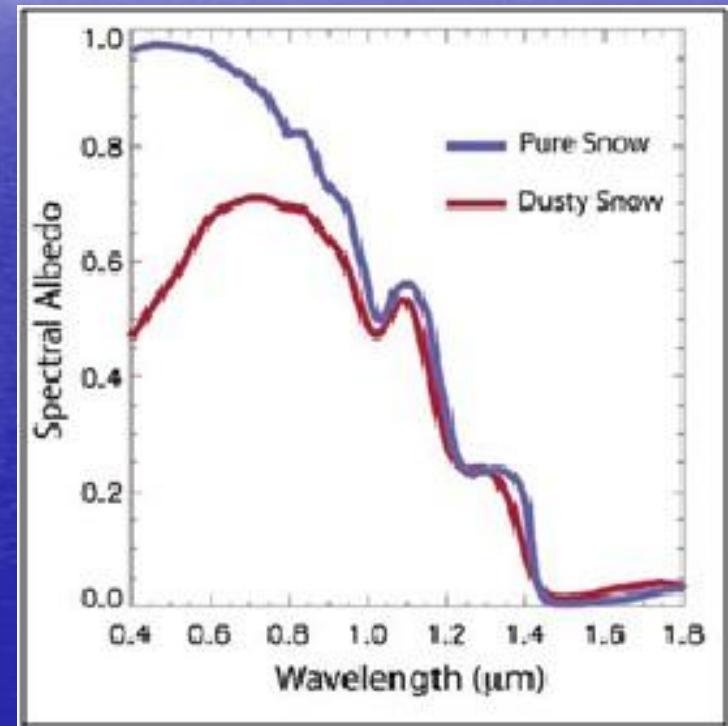
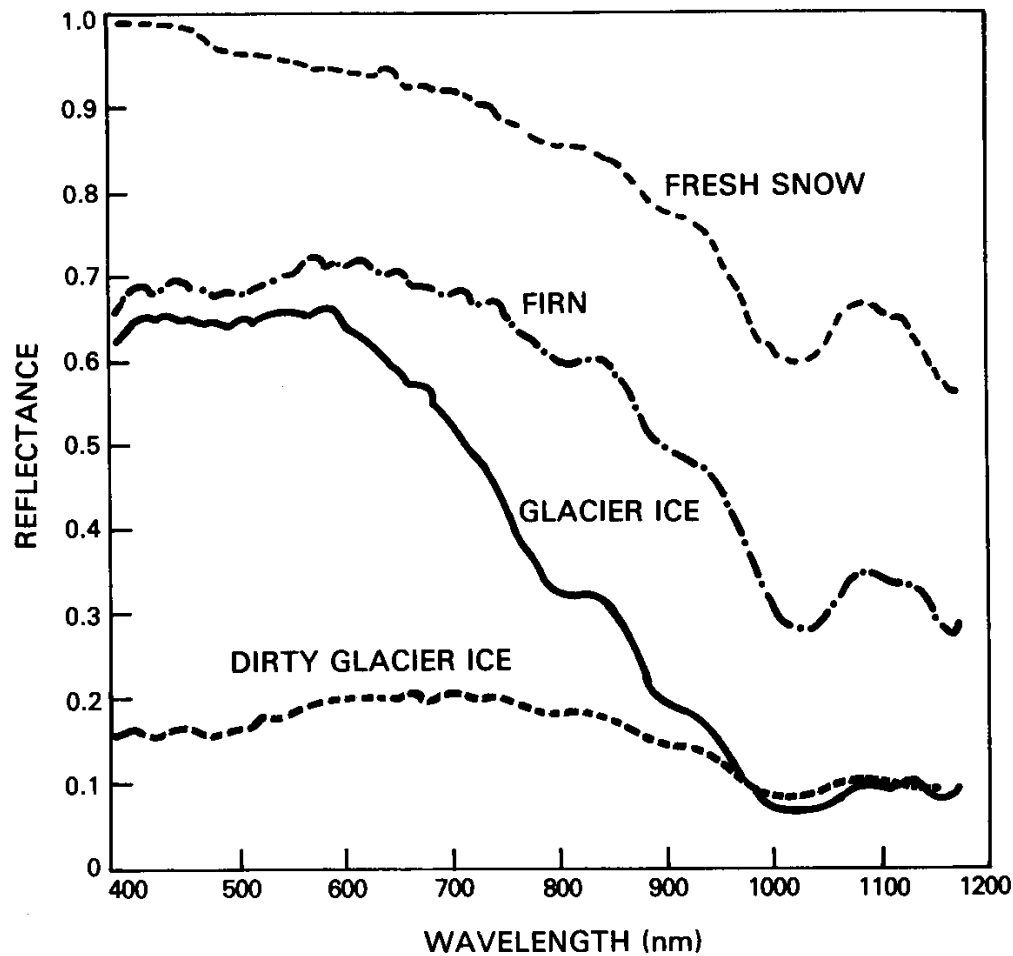
Zakładając, że  $F_{sw}$  wynosi podczas lata polarnego ok.  $100 \text{ W/m}^2$  otrzymujemy zmianę bilansu o  $70 \text{ W/m}^2$



# Własności optyczne śniegu. Czy śnieg jest biały?



# Zmiany spektralne albedo różnych rodzajów śniegu





# Śnieg nie zawsze jest biały

- Aerosole absorbujące poza tym, że pochłaniają światło w atmosferze przyczyniając się do wzrostu energii pochłanianej przez system klimatyczny, mogą zmieniać albedo ziemi
- Największą rolę odgrywają w tym przypadku obszary pokryte śniegiem lub lodem, gdzie depozycja sadzy prowadzi do redukcji albedo śniegu co skutkuje dodatnim wymuszaniem radiacyjnym



# Smog arktyczny – czyli skąd się bierze brudny śnieg w Arktyce?



- To zjawisko ograniczenia widzialności związane z obecnością w atmosferze dużej ilości aerozoli (prawdopodobnie głównie antropogenicznych).
- Zjawisko jest obserwowane wiosną od (lutego do maja) w wysokich szerokościach geograficznych.
- Prawdopodobna przyczyna to transport zanieczyszczeń z rejonu Europy, Ameryki Północnej lub Azji.





# Pomiary w Arktyce

- Aethalometer AE-51 (880 nm)
- HandiLaz Mini PMS (0.3-0.5, 0.5-5, >5  $\mu\text{m}$ )
- Vaisala radiosonde RS92SGP
- GOPRO camera
- STS spectrometer

Profiles up to 1.8 km (vertical speed about 1-1.3 m/s)

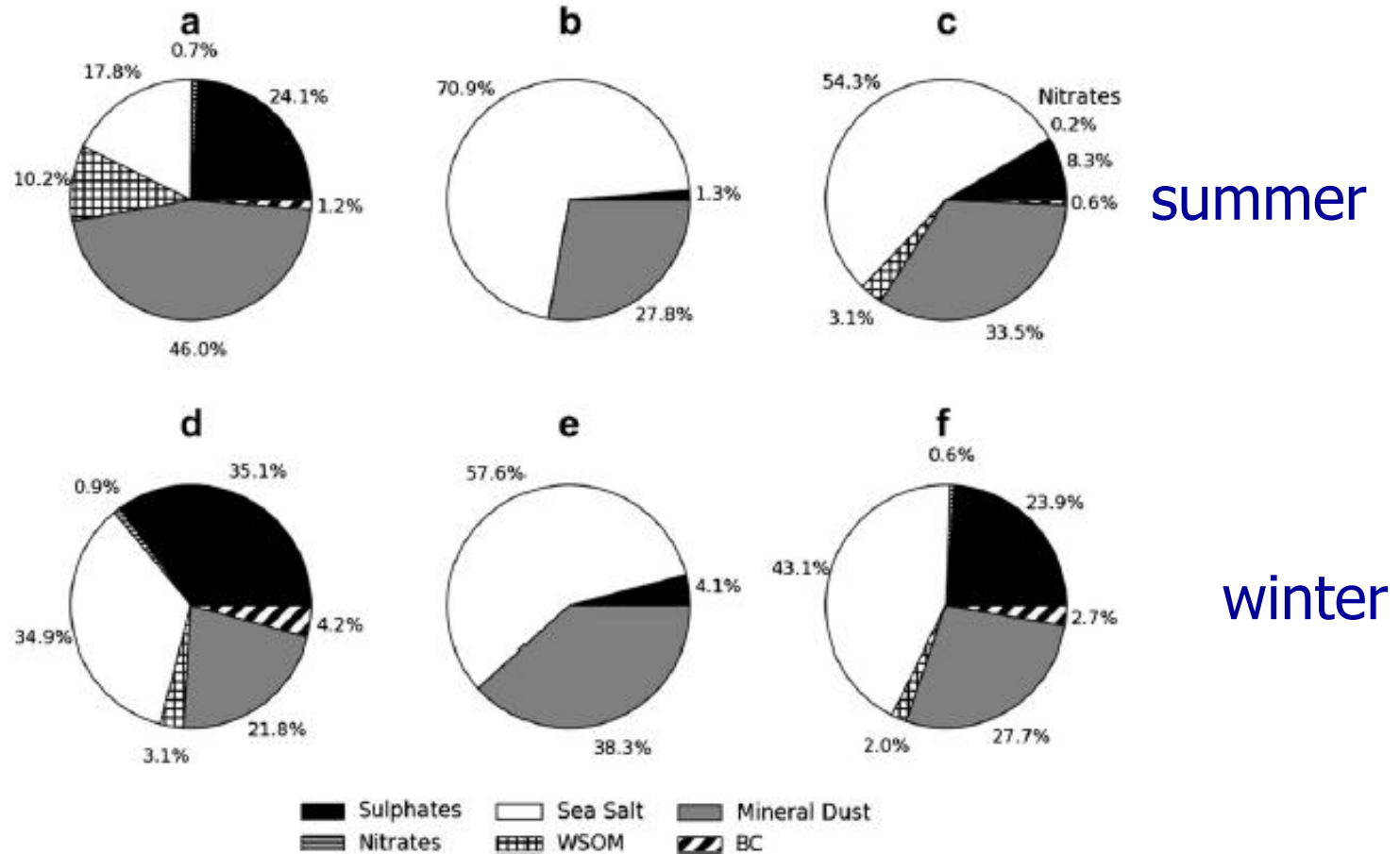
NARLa



NARLa (Near-range  
Aerosol Raman lidar)

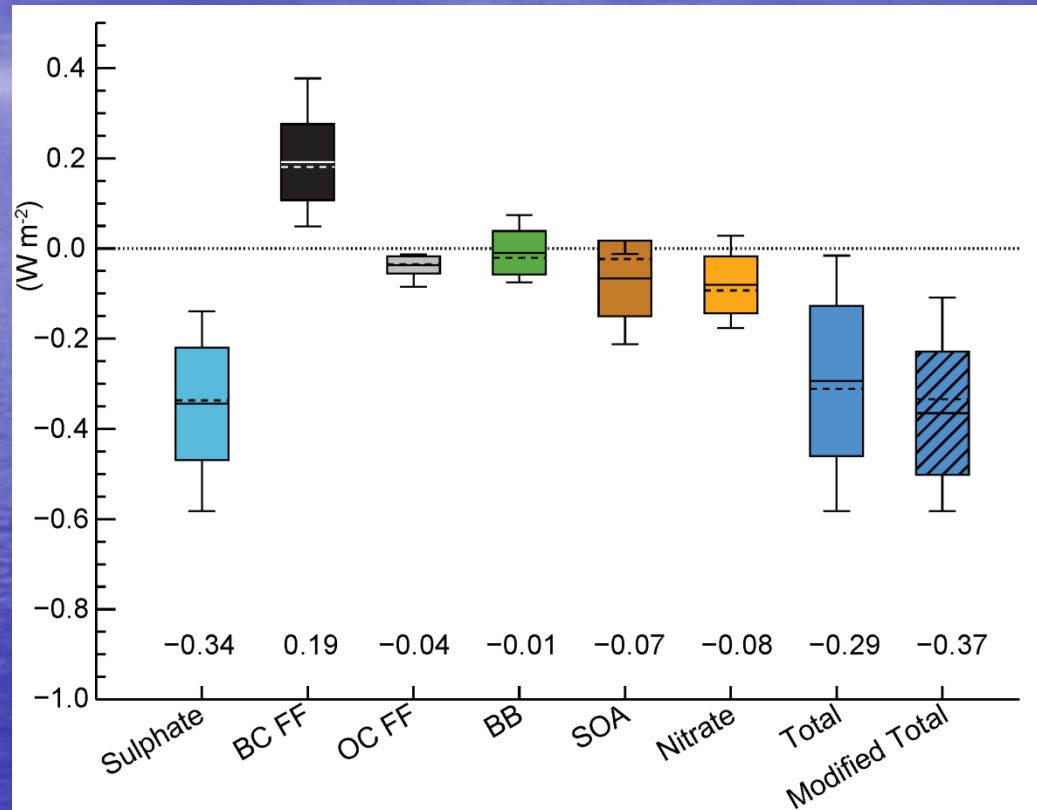


# Skład chemiczny aerozolu arktycznego



**Fig. 10.** Upper part: average composition diagrams of the summer ground-level particulate matter sampled at Barrow from June to September for (a) submicron, (b) supermicron, and (c) overall particle size-distributions, pertaining mainly to summer BG aerosol cases. Lower part: as in the upper part for the period from October to May, for (d) submicron, (e) supermicron, and (f) overall particle size-distributions. Different crosshatching patterns were used to indicate the six main particulate matter constituents (WSOM = Water-Soluble Organic Matter; BC = Black Carbon).

# Wpływ aerozoli na globalny system klimatyczny

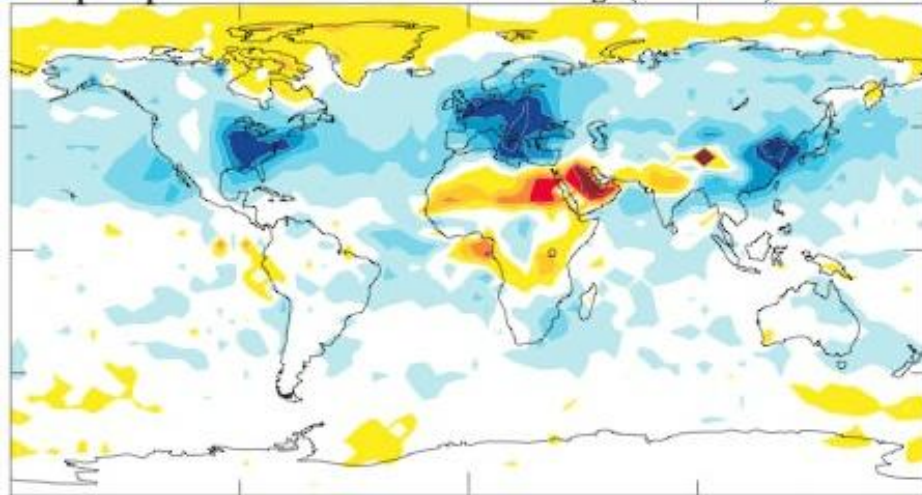


Myhre et al. (2012).

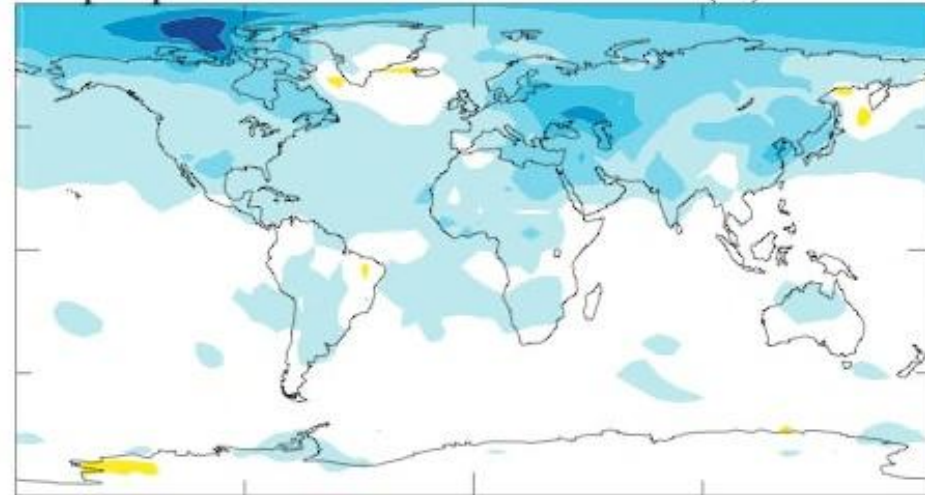


# Wymuszenia klimatyczne

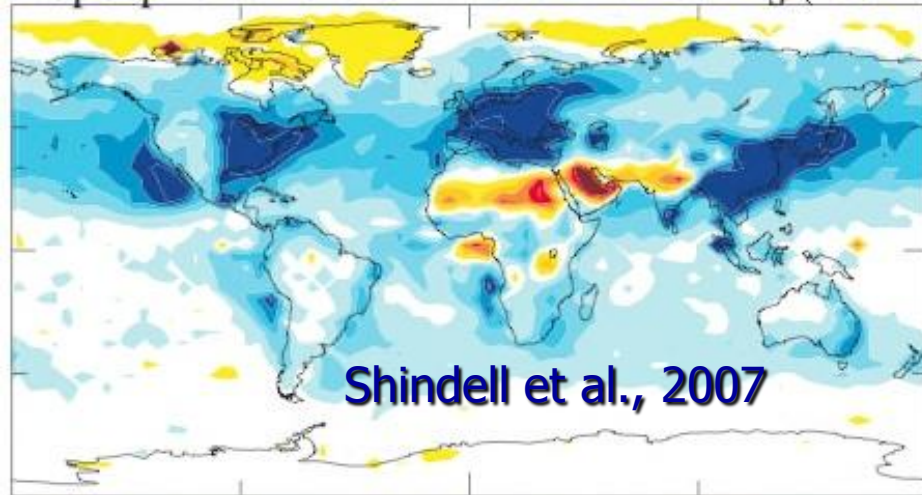
Tropospheric aerosol direct  $F_S$  ( $W/m^2$ )



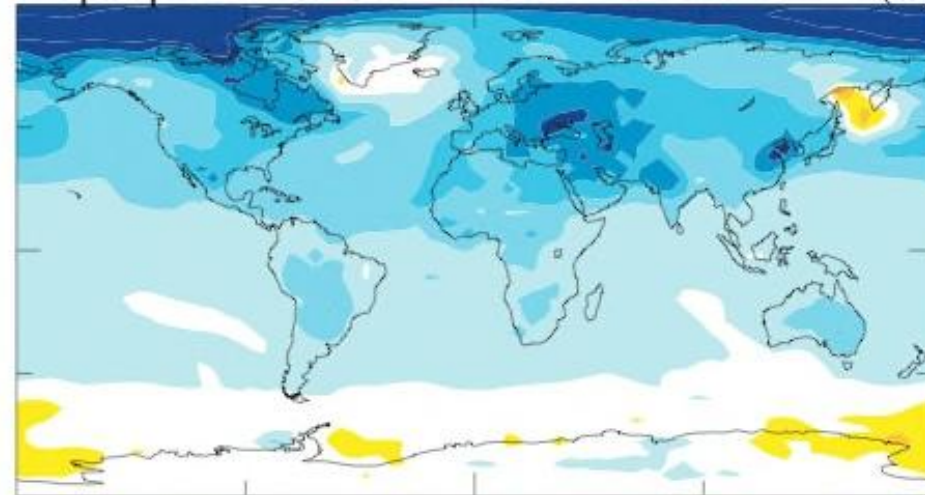
Tropospheric aerosol direct dSAT (C)



Tropospheric aerosol direct+indirect  $F_S$  ( $W/m^2$ )

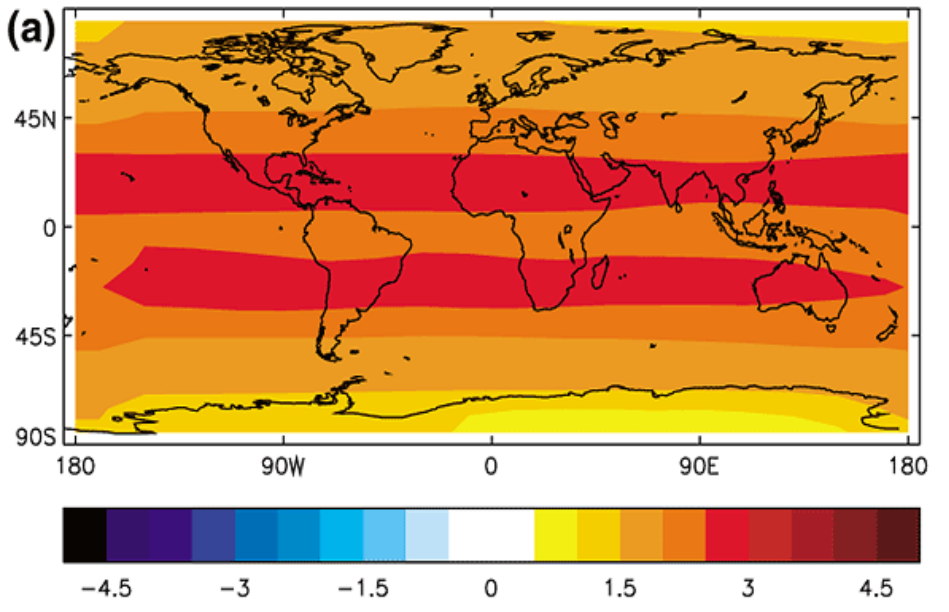


Tropospheric aerosol direct+indirect dSAT (C)

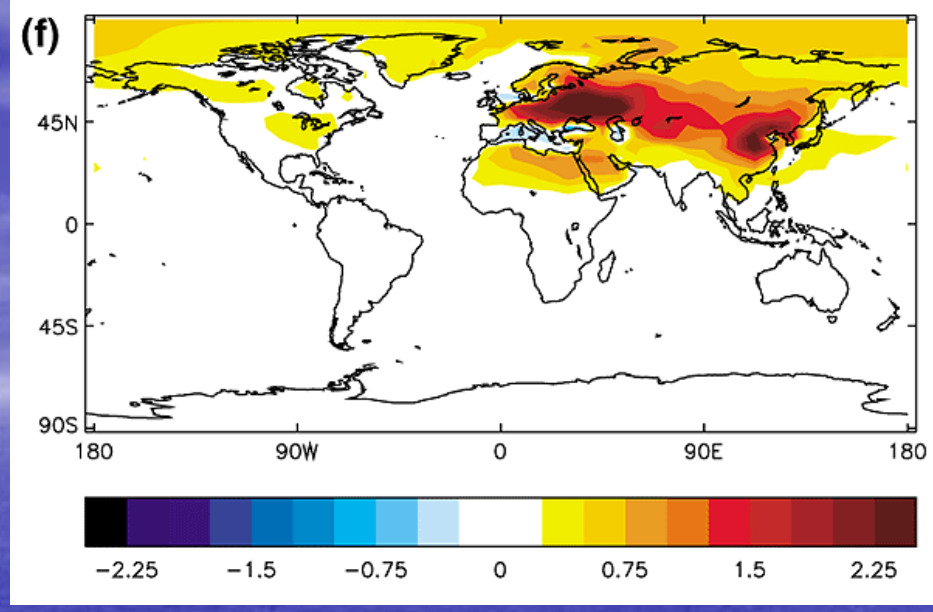


-4.5 -3.5 -2.5 -1.5 -.5 .5 1.5 2.5 3.5 4.5

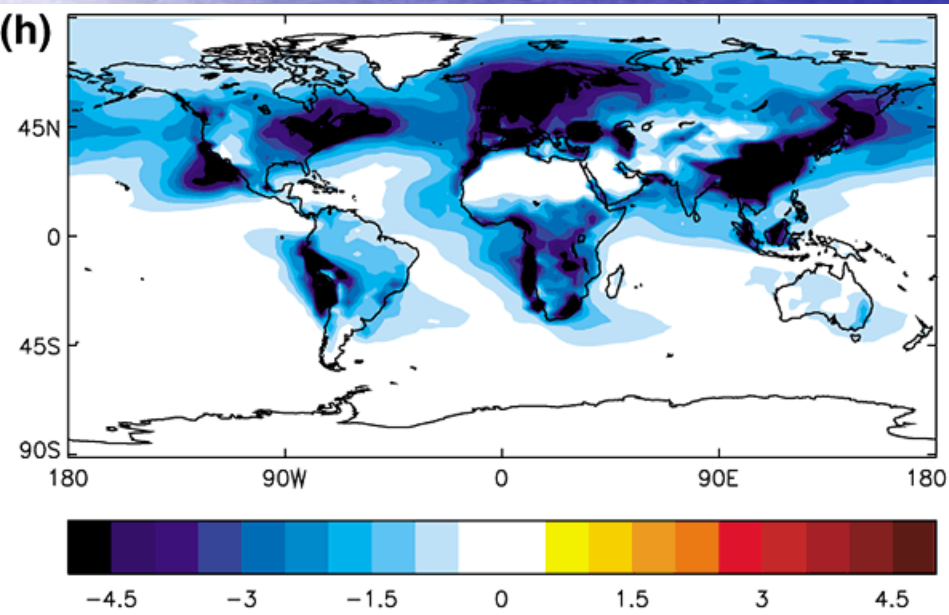
-2.9 -1.8 -1.4 -1 -0.6 -0.2 .2 .6 1 1.4 1.8 2.2



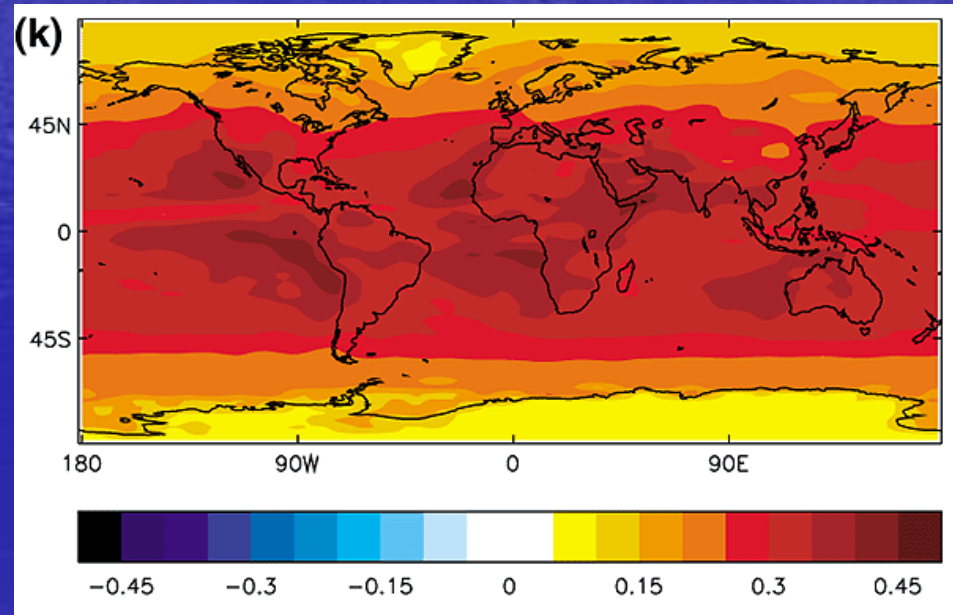
Wymuszanie przez gazy cieplarniane



Wymuszanie przez cząstki sadzy

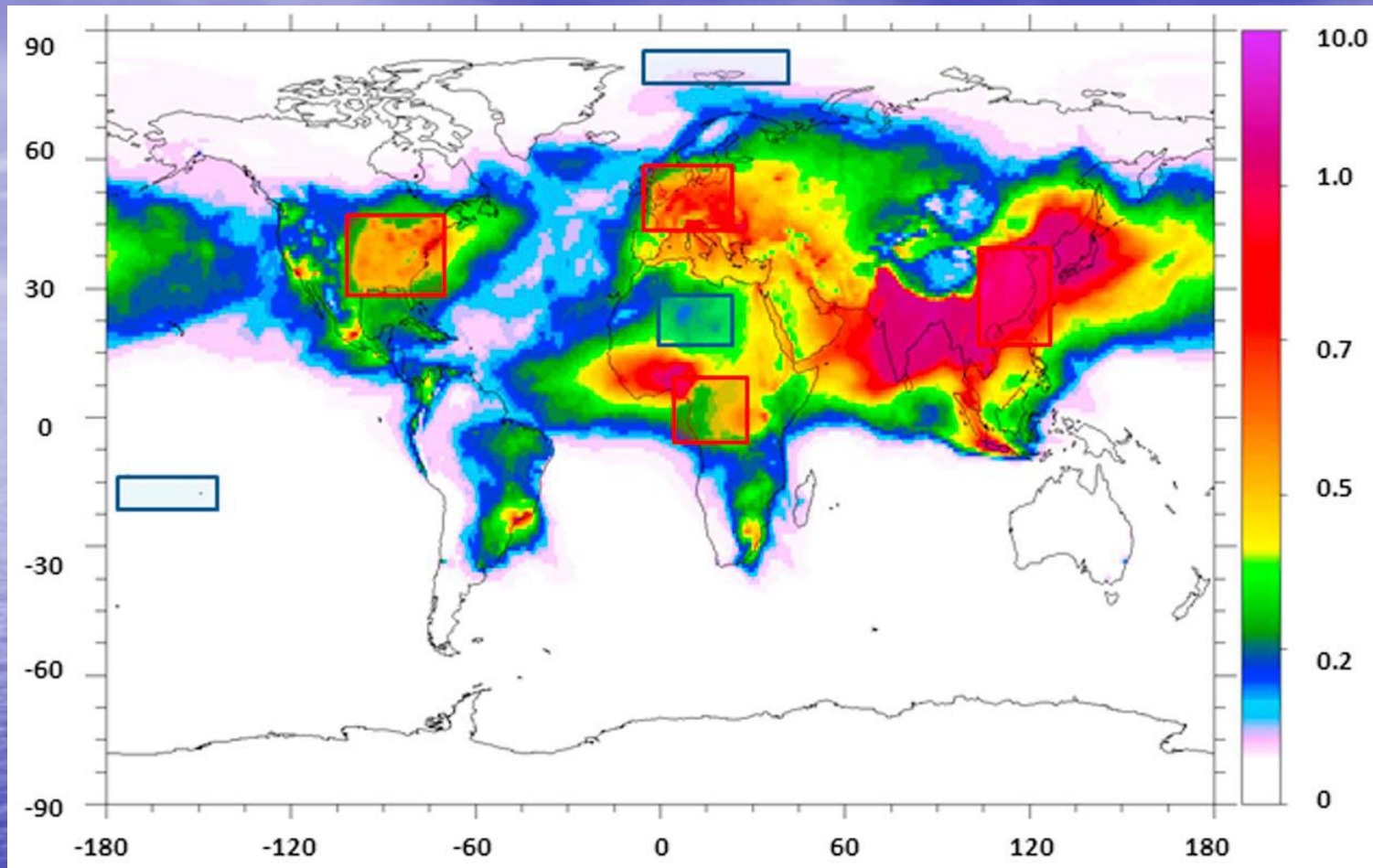


Wymuszanie przez siarczany



Wymuszanie przez słońce





Średnioroczna zawartość sadzy w pionowej kolumnie atmosfery,  
Samset and Myhre 2011.

# Zmiany albedo śniegu związana z sadzą

Table 1. Measured BC amount and calculated visible snow albedo change

Location	Observed $A_w$ , %	BC amount, ppbw	Calculated $\Delta A_v$ , %			
			New snow		Old snow	
			Ext	Int	Ext	Int
Arctic, 1980s	≈90–97	10 (low)	0.8	1.5	2.5	4.5
		30 (mean)	1.9	3.2	6.0	9.5
NH land	≈88–95	20 (low)	1.5	2.5	4.5	7.7
		60 (high)	3	5	9	14
Greenland		2 (low)	0.3	0.5	0.7	1.2
		6 (high)	0.5	0.9	1.7	3.0
Antarctica		0.2 (South Pole)	.05	0.1	0.1	0.2
		2.5 (Ross Shelf)	0.3	0.5	0.8	1.5

NH, Northern Hemisphere; Ext, external mixing; Int, internal mixing.

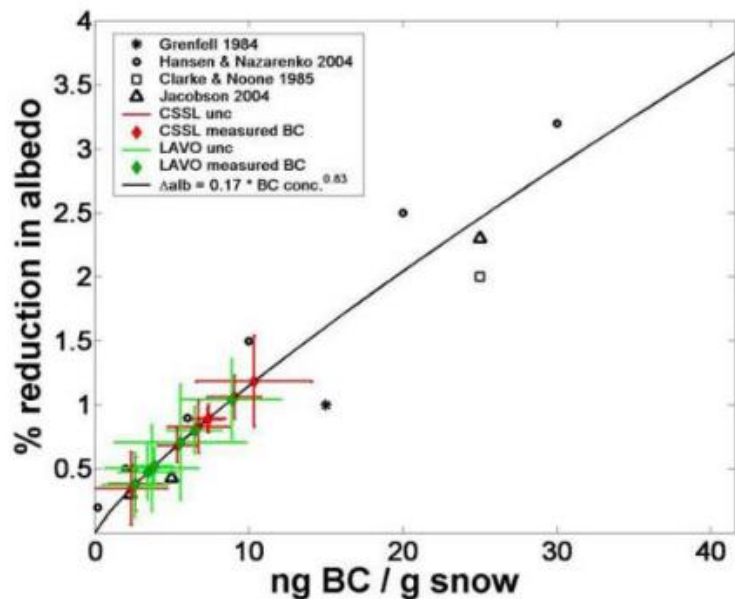


Fig. 2. Model results for BC induced albedo reduction on snow and subsequent potential for measured BC concentrations in falling snow at LAVO and CSSL to reduce snow surface albedo.

Zarówno ilość cząstek absorbujących zdeponowanych na śniegu jak i wielość kryształów/wiek pokrywy śnieżnej powoduje redukcję albedo (Flanner et al., 2007)

- Hadley et al., 2010.



# Pokrywa śnieżna a sadza c.d.

- Pokrywa śnieżna i lodowa pokrywa w zależności od czasu około 7.5-15% powierzchni ziemi
- Światło słoneczne penetruje około 10-20 cm w głąb śniegu
- Pierwsze 5 cm otrzymuje najwięcej promieniowania i znajdujące się tam cząstki absorbujące mogą znacząco wpływać na bilans energii w śniegu oraz strumień promieniowania odbijanego od śniegu.
- Pomiar koncentracji cząstek absorbujących w śniegu jest kluczowy dla oszacowania wpływu na klimat.
- Ponadto, rdzenie lodowe zawierające cząstki absorbujące są bezcennym źródłem informacji o procesach naturalnych i antropogenicznych związanych z emisją, transportem i depozycją cząstek absorbujących

# Ile sadzy znajduje się w śniegu?

- Masowy stosunek zmieszania sadzy w śniegu wyraża się na ogół w ng/g lub ppm

Location	Observed $A_v$ , %	BC amount, ppbw	Calculated $\Delta A_v$ , %			
			New snow		Old snow	
			Ext	Int	Ext	Int
Arctic, 1980s	≈90-97	10 (low)	0.8	1.5	2.5	4.5
		30 (mean)	1.9	3.2	6.0	9.5
NH land	≈88-95	20 (low)	1.5	2.5	4.5	7.7
		60 (high)	3	5	9	14
Greenland		2 (low)	0.3	0.5	0.7	1.2
		6 (high)	0.5	0.9	1.7	3.0
Antarctica		0.2 (South Pole)	.05	0.1	0.1	0.2
		2.5 (Ross Shelf)	0.3	0.5	0.8	1.5



# Średni stosunek zmieszania sadzy w śniegu

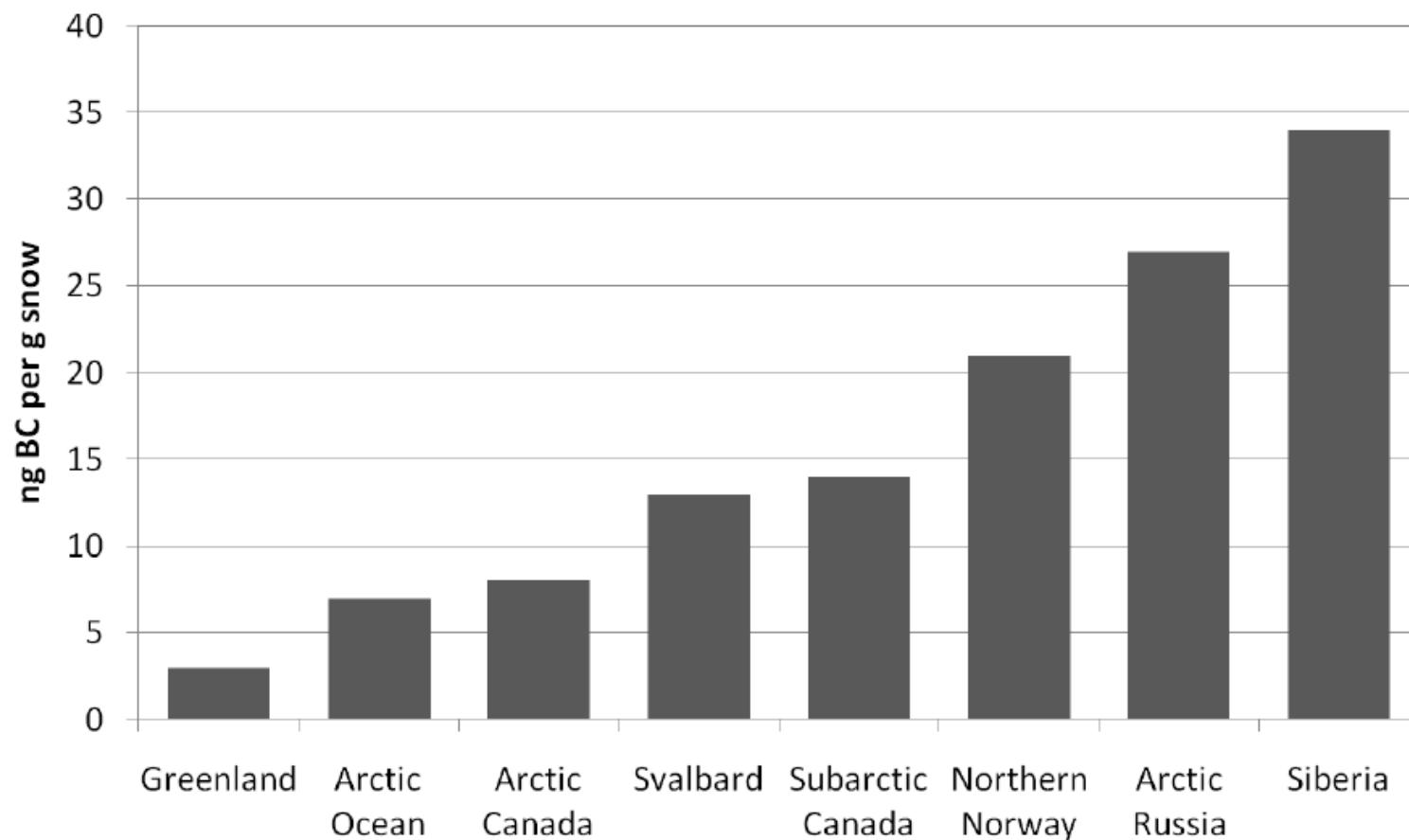
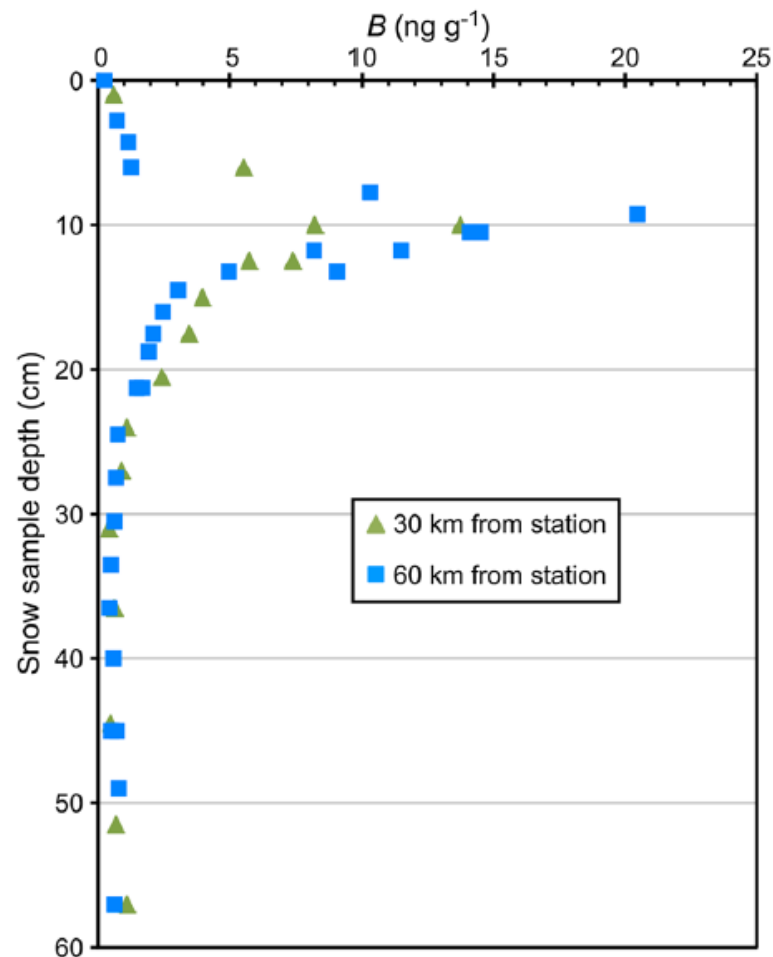


Figure 5-18. BC Concentrations in Surface Snow in Arctic and Subarctic Areas of the Northern Hemisphere. (Source: Derived from recent measurements reported in Doherty et al., 2010)

# Przykładowy profil stosunku zmieszania sadzy w śniegu

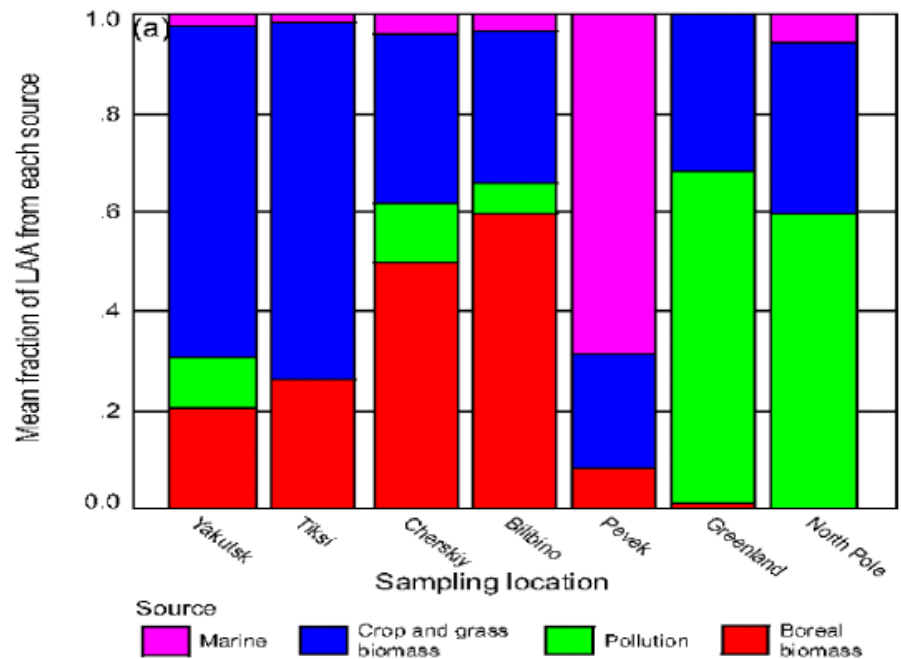
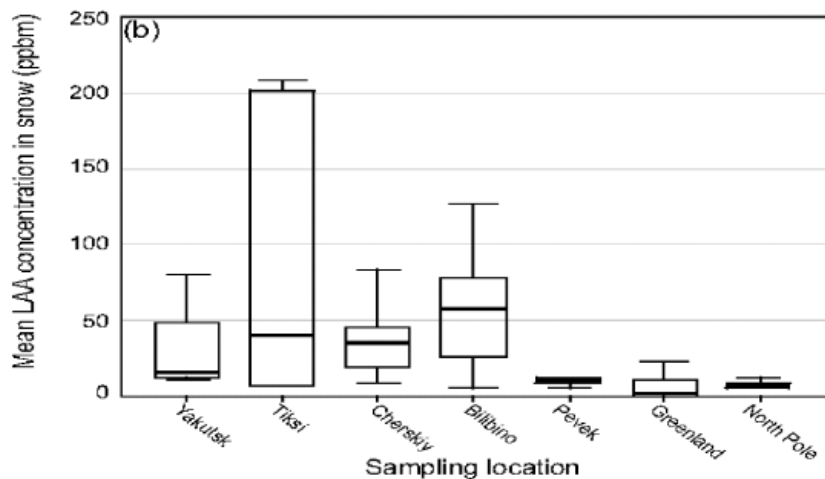
- W rejonach polarnych w szczególności półkuli południowej zawartość sadzy w śniegu jest bardzo mała. Dla stacji Vostok wynosi 0.1–0.7 ng/g



**Figure 1.** The estimated concentration of BC,  $B$ , in snow samples gathered in July, 2008 from two sites upwind from the Dye-2 research station on the Greenland ice sheet. This profile included a melt layer, buried by a few centimeters of newly fallen snow (modified from Figure 10a of *Doherty et al.* [2010]).



# Pochodzenie sadzy zawartej w śniegu w różnych rejonach świata

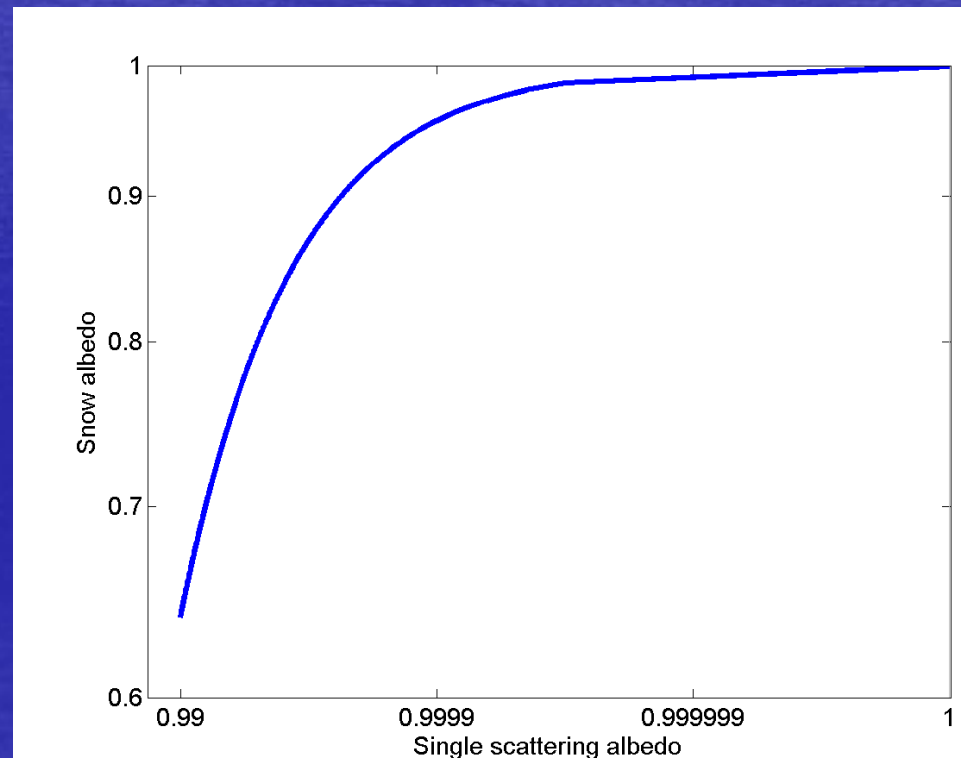


**Figure 5-22. Sources of BC in Arctic Snow.** (a) Fractional source contributions to Light Absorbing Aerosol (LAA) snow concentrations in Siberia (Pevek, Bilbino, Cherskiy, Tiksi, Yakutsk), the Greenland Ice Sheet, and the North Pole. (b) The box and stem plots represent concentrations of LAA at each location, with error bars indicating the 95% confidence interval. LAA values are derived from a light absorption technique which converts to a mass estimate using calibration factors and are generally equivalent to BC values, although non-BC absorbing aerosols could bias the estimate high. (Source: Hegg et al., 2010)

# Czułość albedo śniegu na zawartość cząstek sadzy

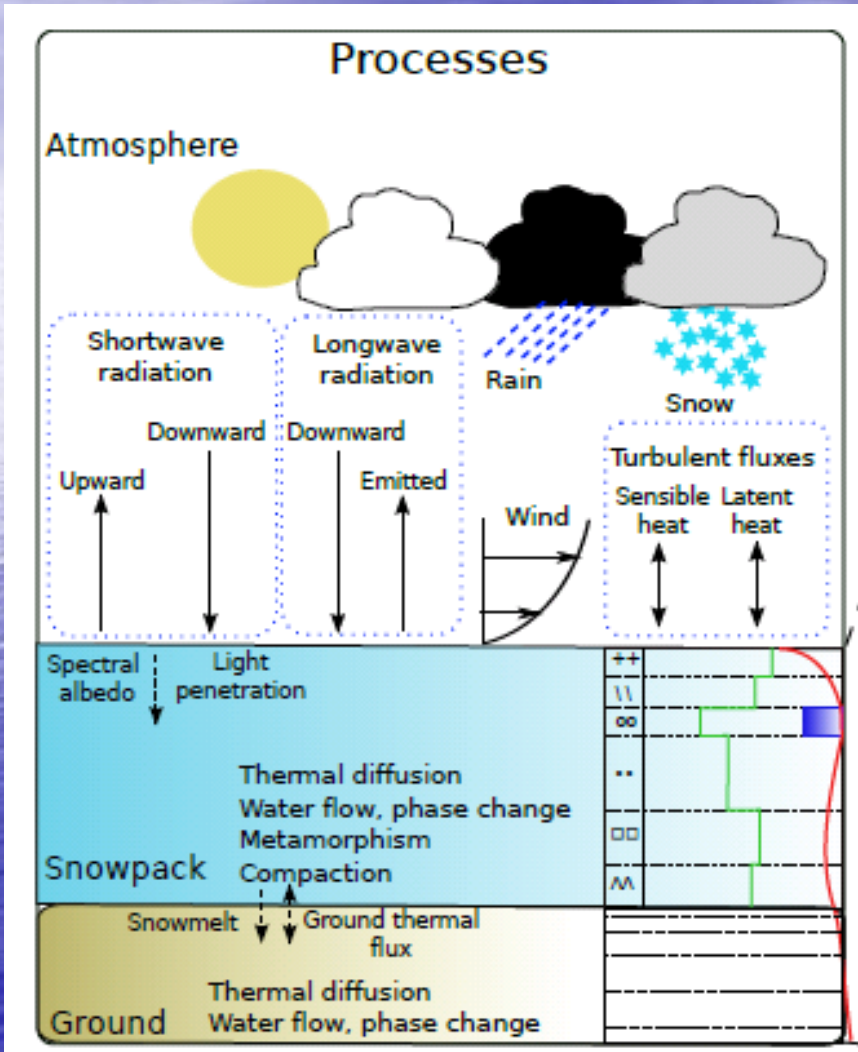
- duża wrażliwości albedo śniegu na zmiany  $\omega$  w zakresie 0.99-0.9999
- oznacza to, że nawet przy niewielkiej ilości sadzy efekt zmiany albedo śniegu jest możliwy (mierzalny)

$$\text{albedo}_{\infty} = \frac{\sqrt{1-\omega^g} - \sqrt{1-\omega}}{\sqrt{1-\omega^g} + \sqrt{1-\omega}}$$





# Zmiany czasowe własności mikrofizycznych śniegu



- Procesy fizyczne zachodzące w śniegu to:
  1. Termodyfuzja
  2. Propagacja promieniowania
  3. Wymiana energii na powierzchni
  4. Sublimacja
  5. Akumulacja (opady śniegu i deszczu)
  6. Transportu wody
  7. Zmiana fazy
  8. Depozycja aerozolu

# Wpływ sadzy na albedo śniegu - podsumowanie

- Wyniki symulacji wskazują, że wzrost stosunek zmieszana sadzy w śniegu 10-100 ppm prowadzi do redukcji albedo śniegu w zakresie 1-5%.
- Wielkość kryształów śniegu rośnie z czasem co powoduje, że światło słoneczne penetruje do głębszych warstw co powoduje spadek albedo
- Grubość optyczna śniegu jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości kryształów co oznacza, że transmisja światła maleje ze spadkiem wielkości kryształów (analogicznie jest w chmurach)
- Dla ustalonego stosunku mieszania sadzy redukcja albedo śniegu jest tym większa im większe są kryształy śniegu.



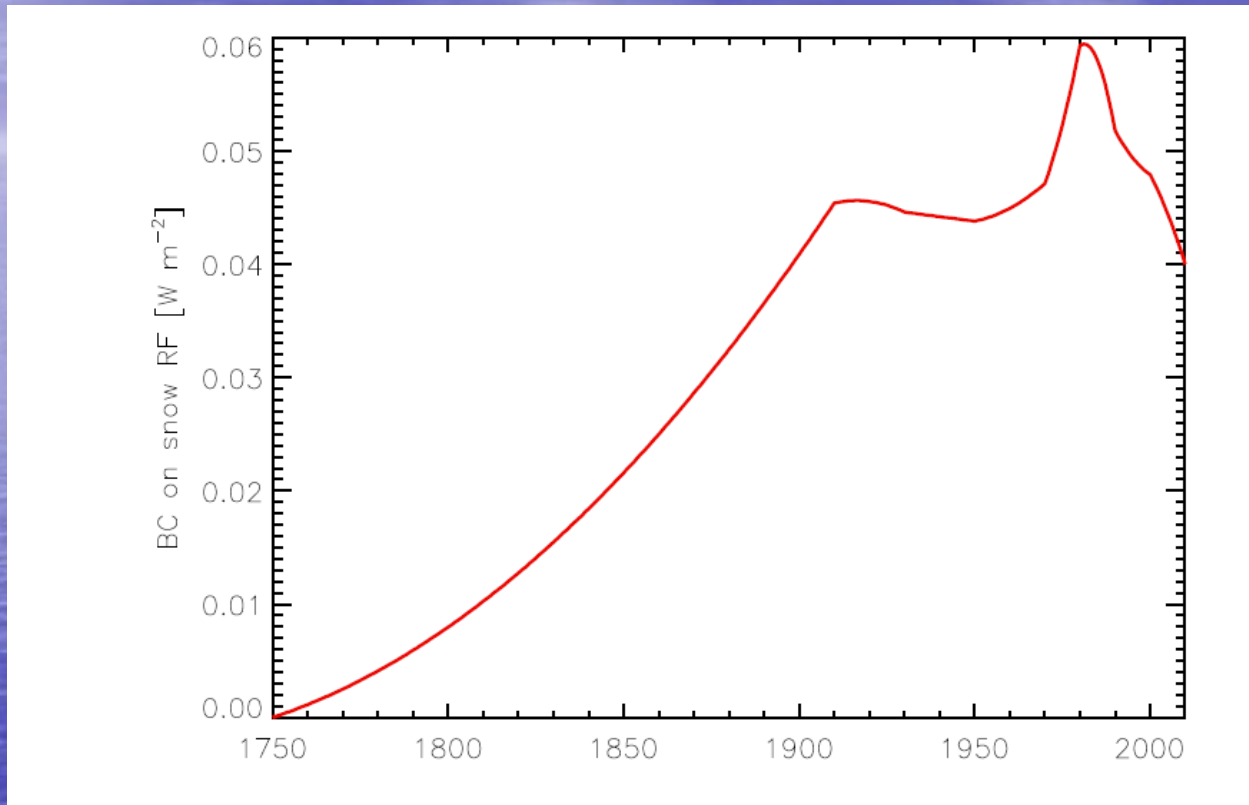
## Wpływ sadzy na albedo śniegu – podsumowanie c.d.

W raporcie IPCC z 2007 stwierdzono, że wymuszanie radiacyjne związane z depozycją sadzy na śniegu wynosi  $+0.1 \pm 0.1$  W/m<sup>2</sup>.

Depozycja sadzy zmniejsza albedo śniegu i lodu o 1.5% w Arktyce i 3% na całej półkuli północnej. Prowadzi to do wymuszania radiacyjnego 0.3 W/m<sup>2</sup> na półkuli północnej (Hansen and Nazarenko, 2004)

W raporcie IPCC z 2013 efekt radiacyjny BC został oszacowany na  $+0.04$  (0.02 to 0.09) W/m<sup>2</sup>. W skali regionalnej wartość wymuszenia może sięgać wartości 0.6 W/m<sup>2</sup> w Arktyce czy 3 W/m<sup>2</sup> w Himalajach.

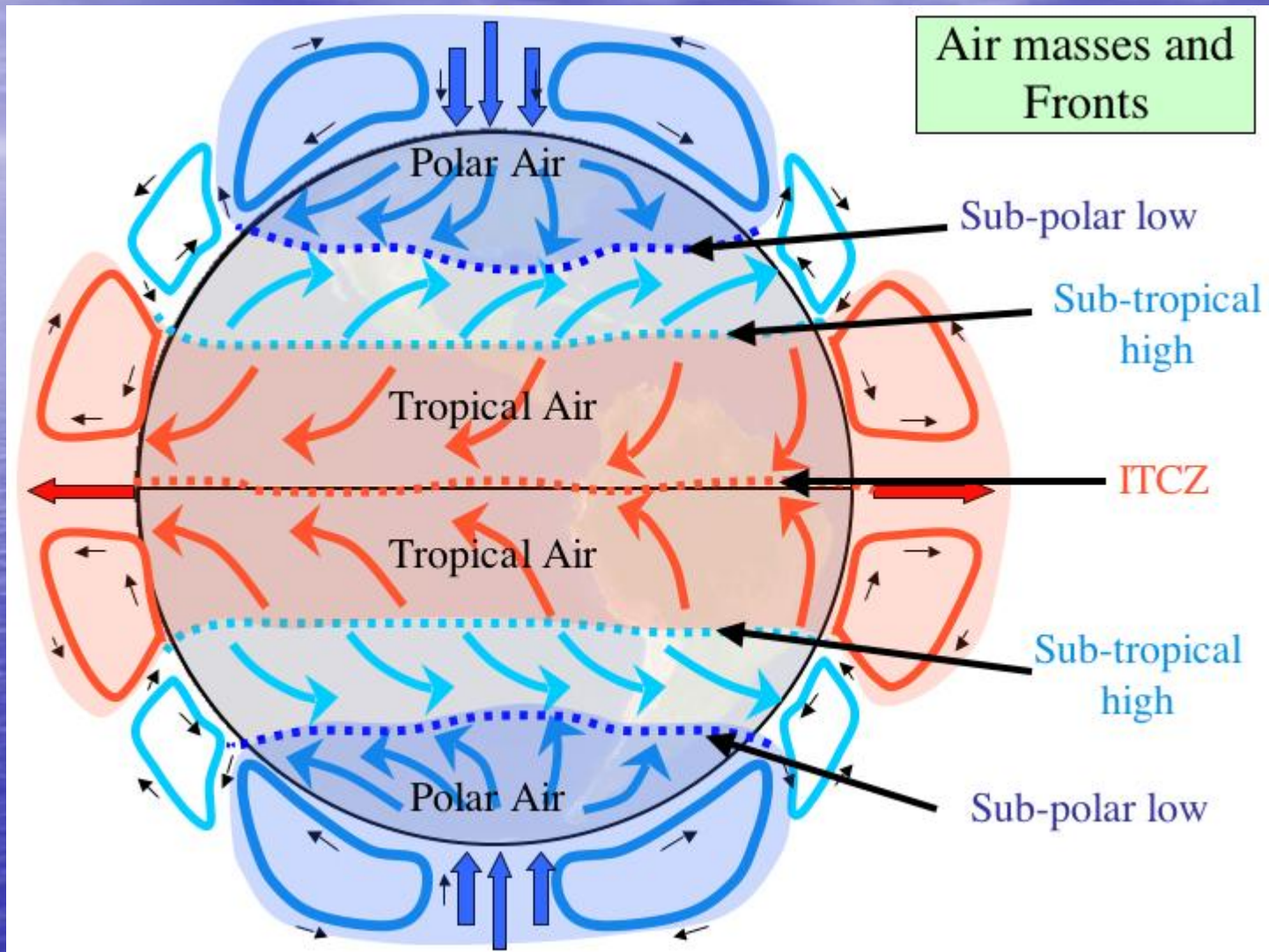
# Zmiany czasowe wymuszania radiacyjnego związanego ze zmianą albedo śniegu wskutek depozycji sadzy.



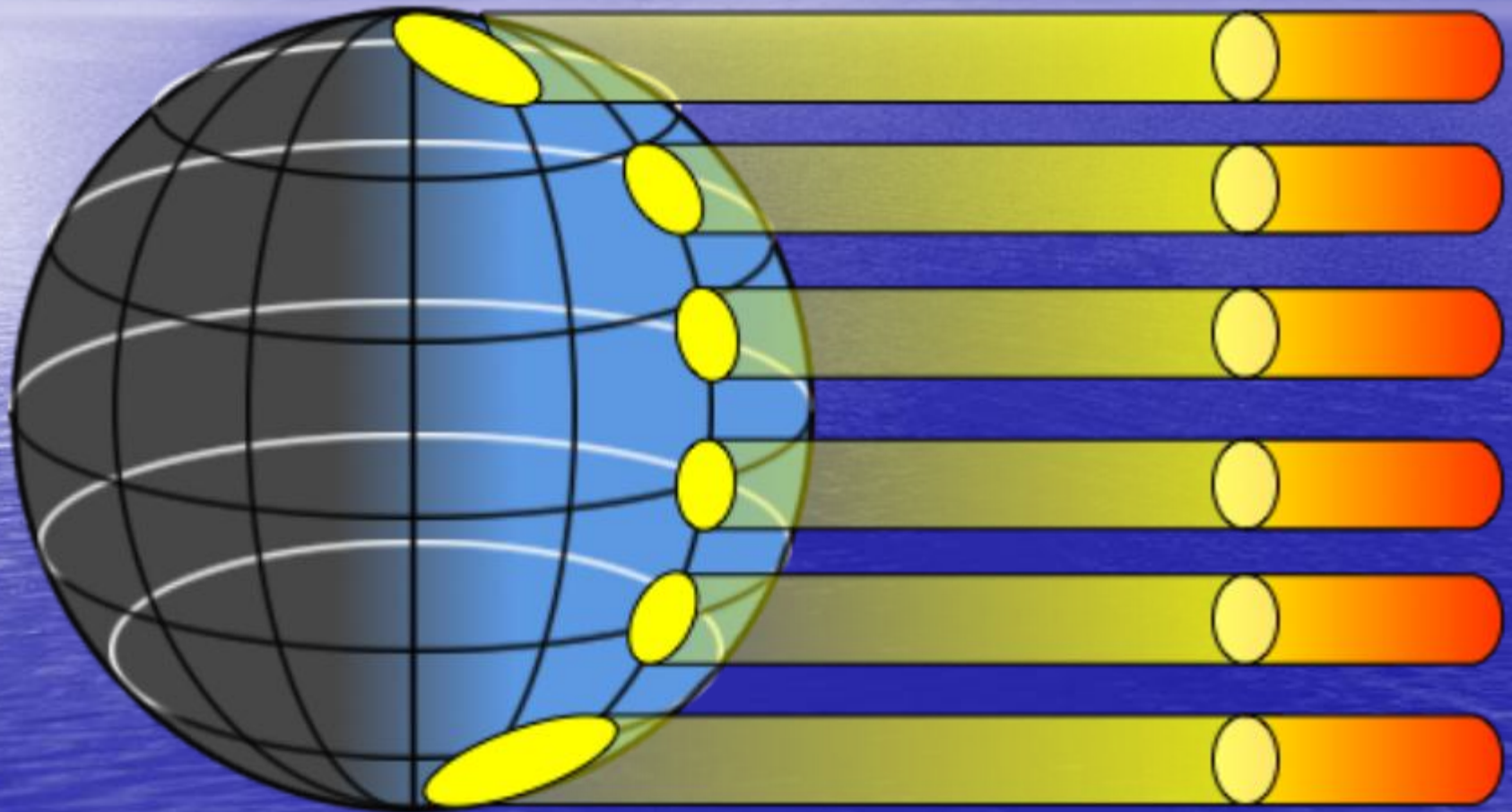
- Time evolution of RF due to BC on snow and ice. The simulations are mainly based on the ACCMIP multi-model study by Lee et al. for the years 1850, 1930, 1980, and 2000. Additional simulations with one model were performed for the years 1750, 1950, 1970, 1990 and 2010.



# Globalna cyrkulacja atmosfery



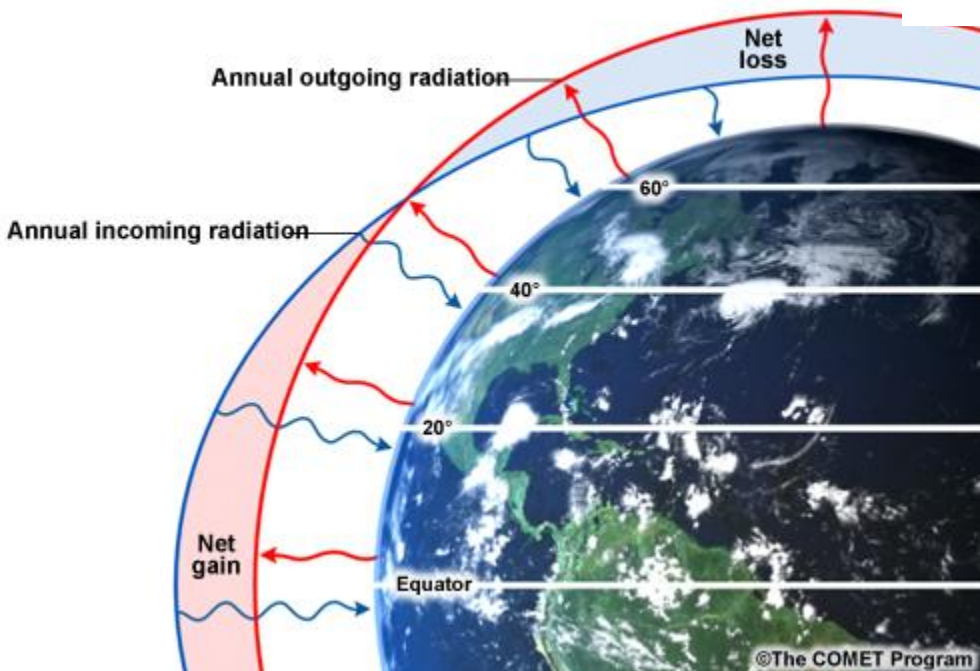
# Zróżnicowanie dopływu energii słonecznej



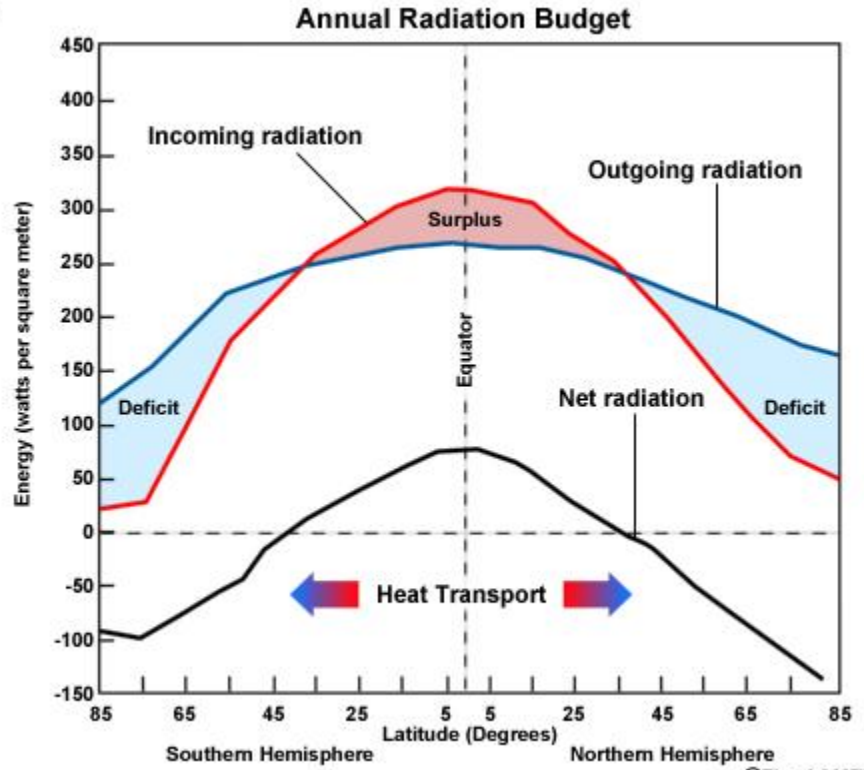


# Bilans energii w atmosferze

a

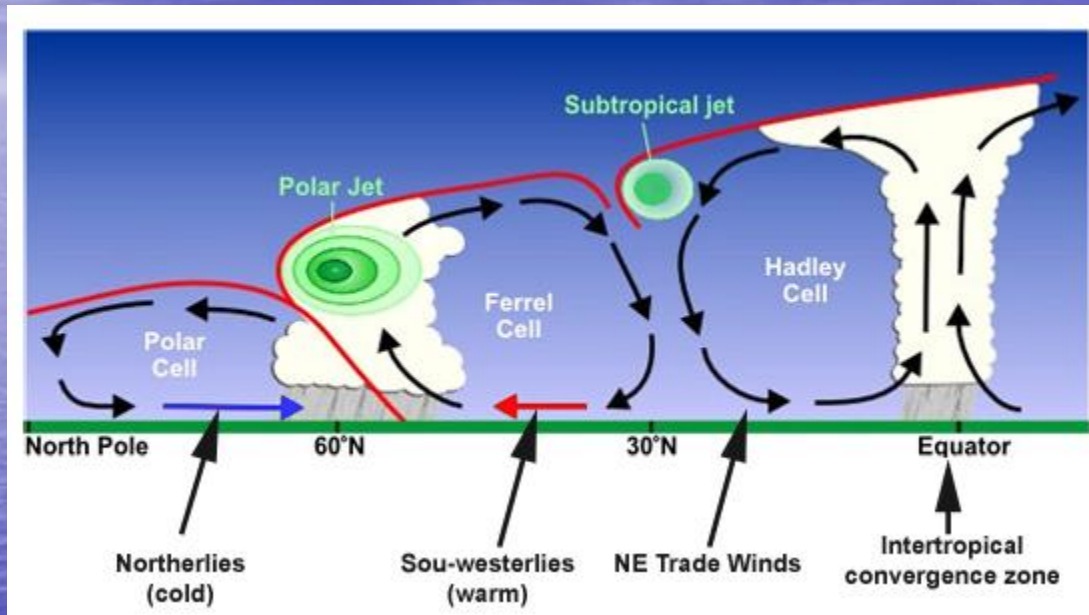


b



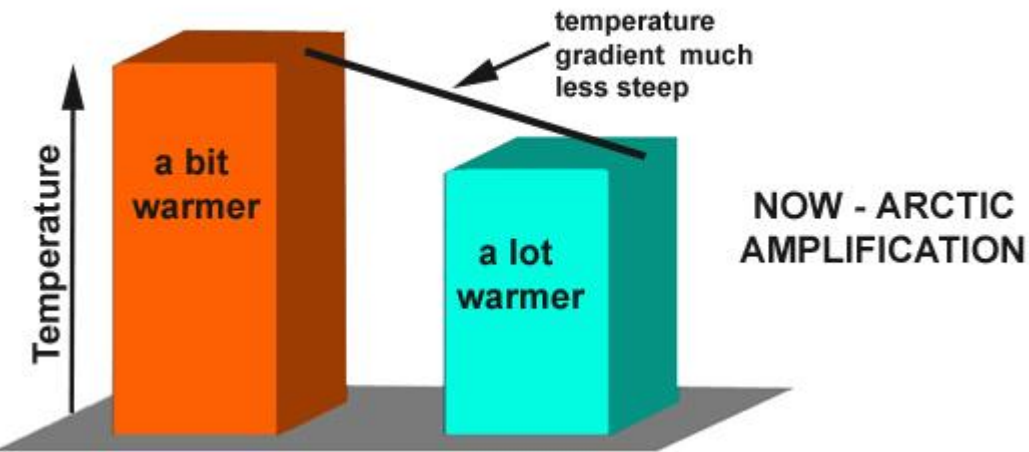
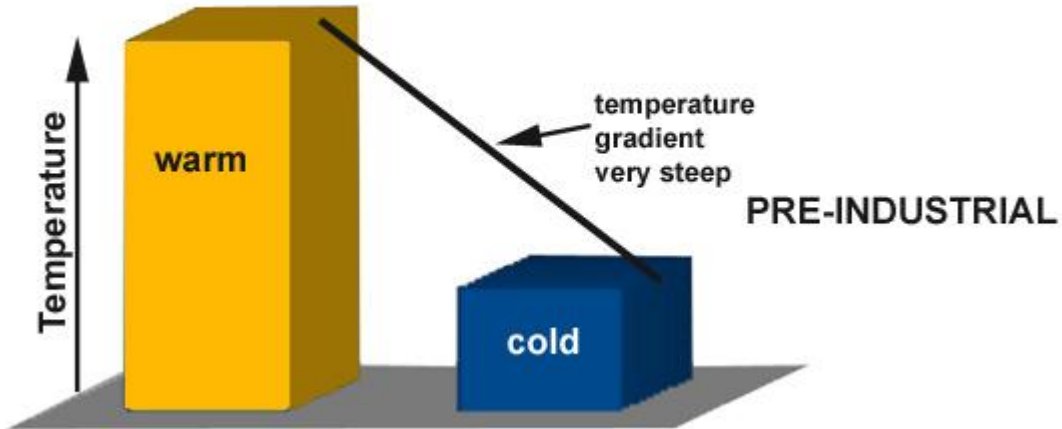
<http://www.geocoops.com/heat-budget--insolation.html>

# Cyrkulacja atmosfery – jako mechanizm wyrównywania kontrastów termicznych

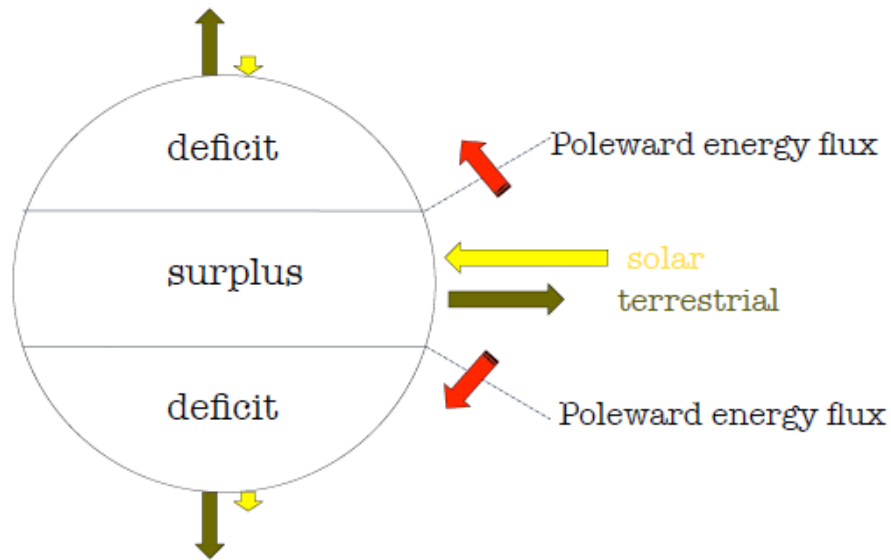




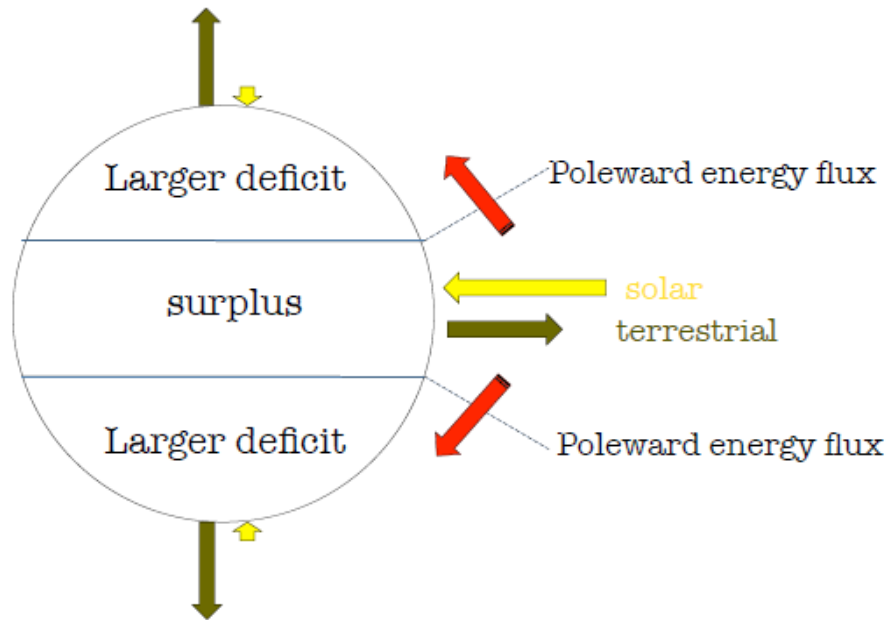
**EQUATOR      NORTH POLE**



(a) Reference Climate



(b) Equable Climate

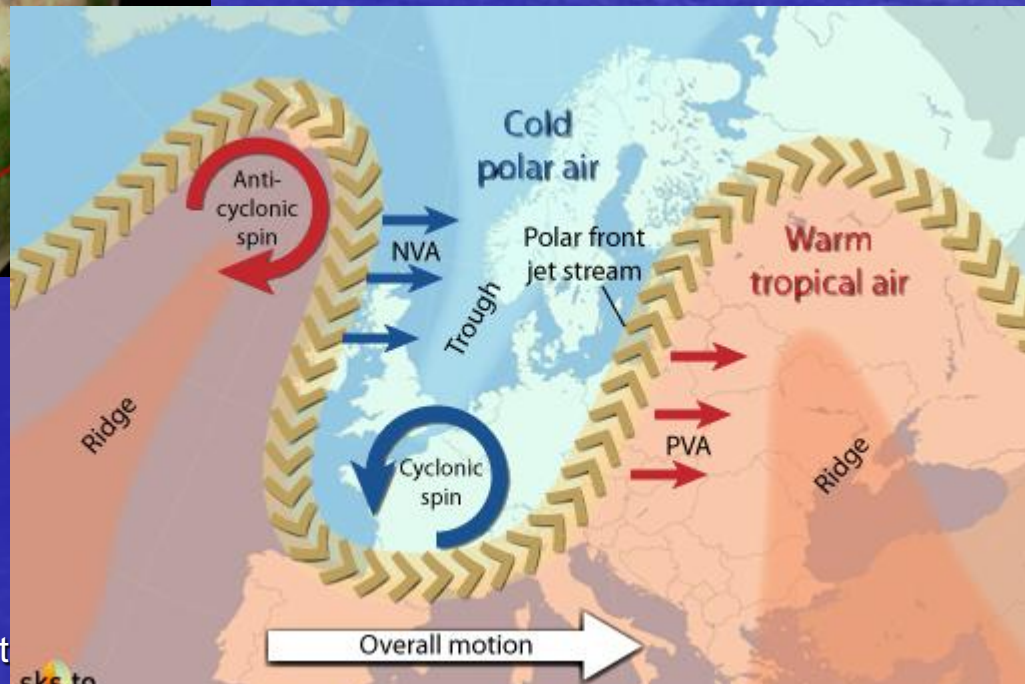
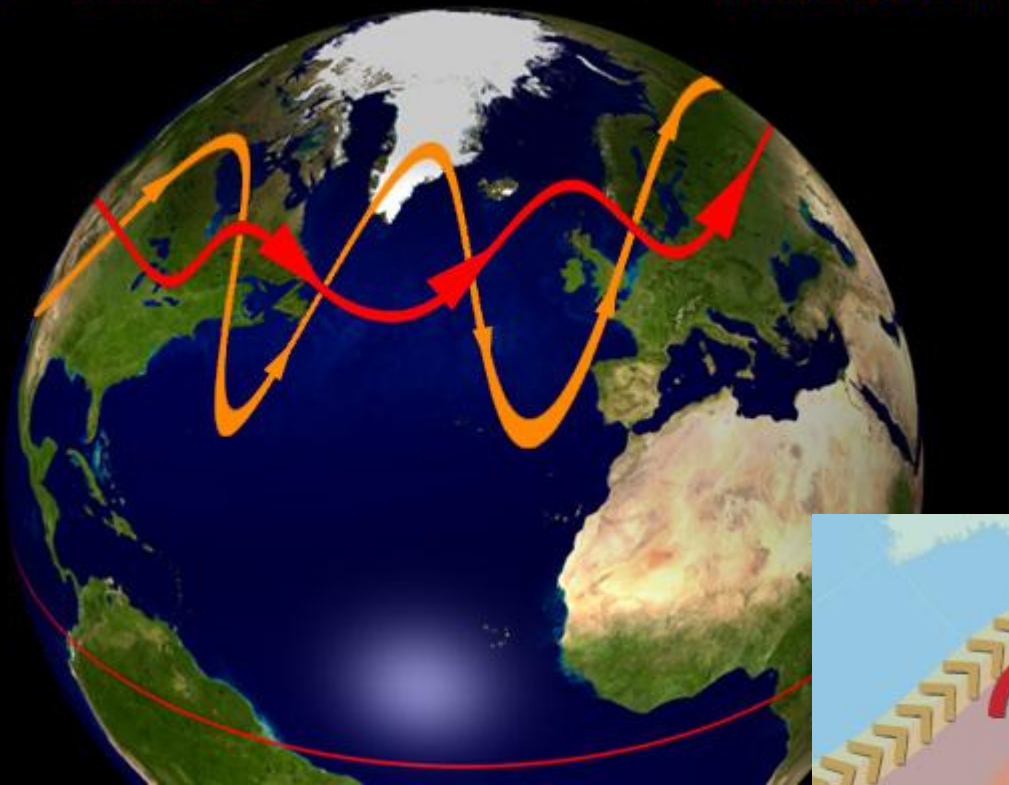


Co byłoby gdyby rosła różnica temperatur pomiędzy równikiem a biegunem?

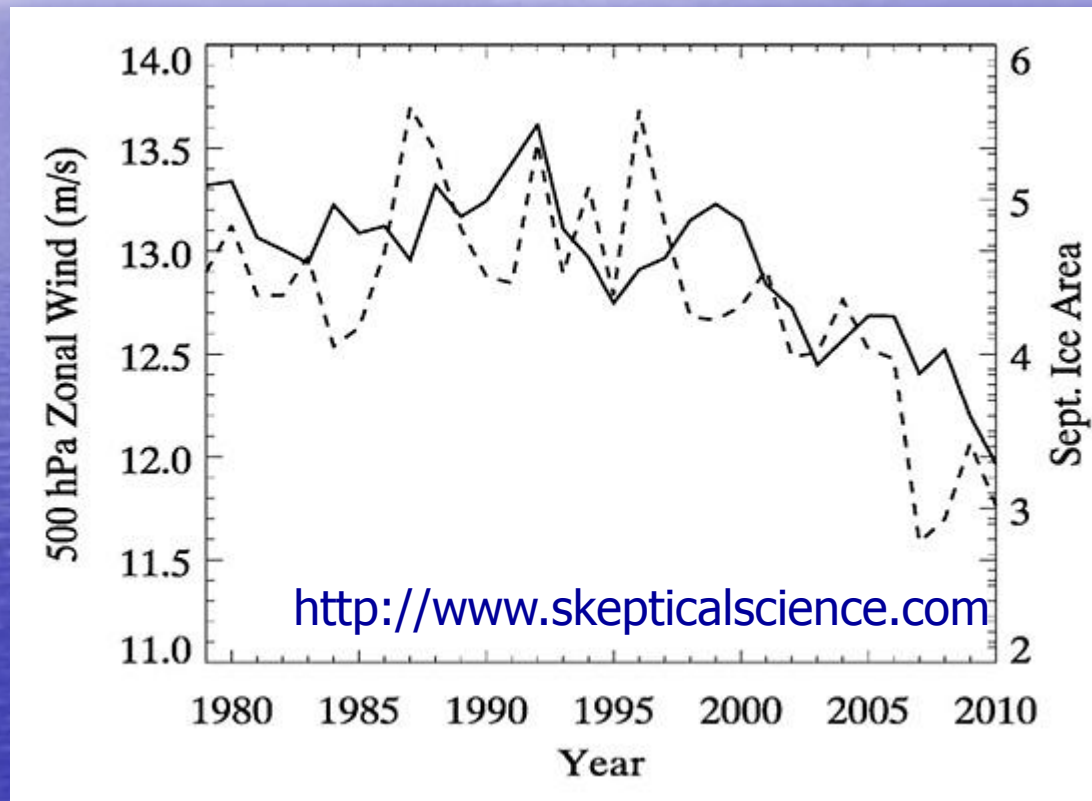


# Przyływ strefowy oraz południkowy

→ = zonal flow      → = meridional flow

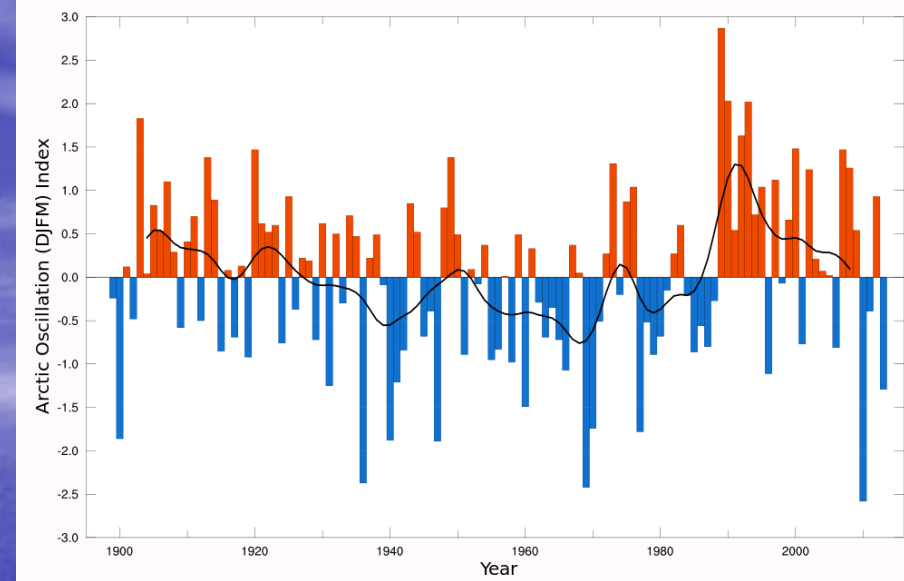


# Obserwujemy, że zmniejszą się cyrkulacja strefowa w środkowej troposferze

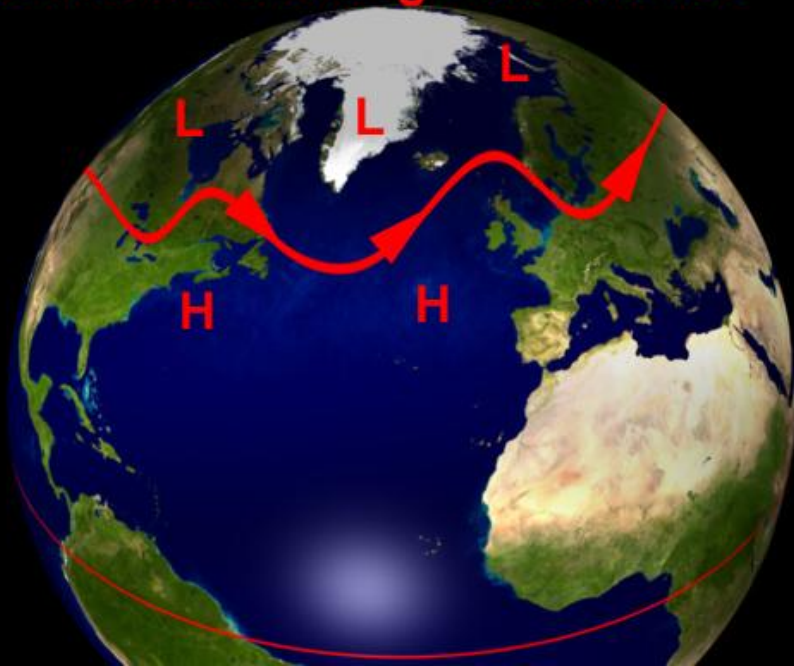




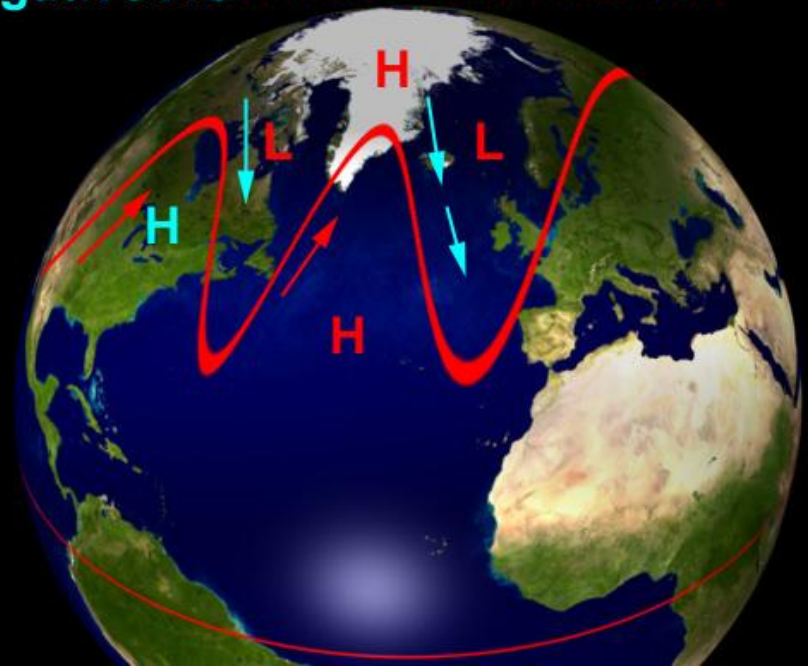
# Oscylacja Arktyczna



**positive AO - strong Polar Vortex**



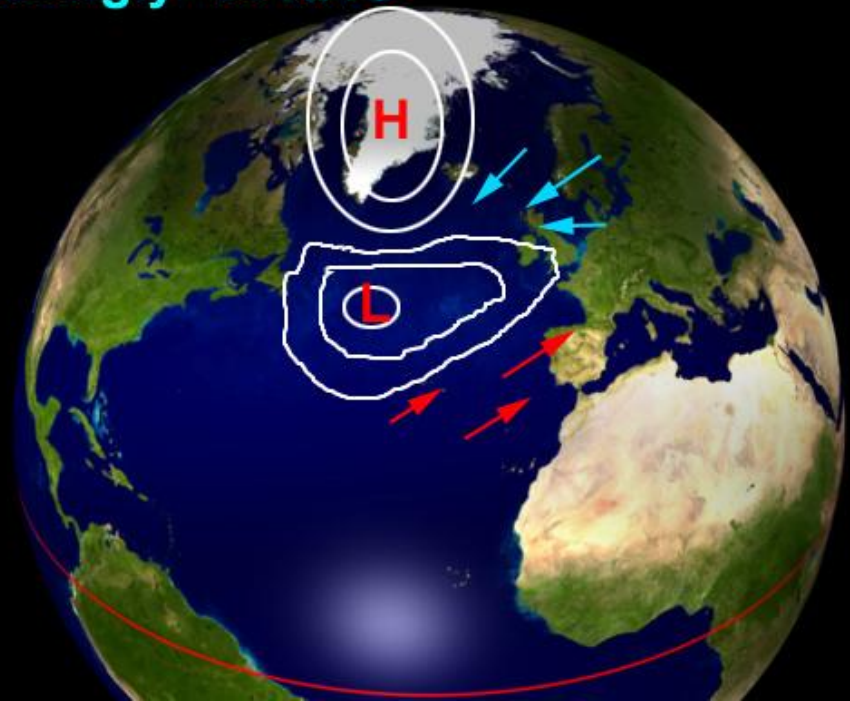
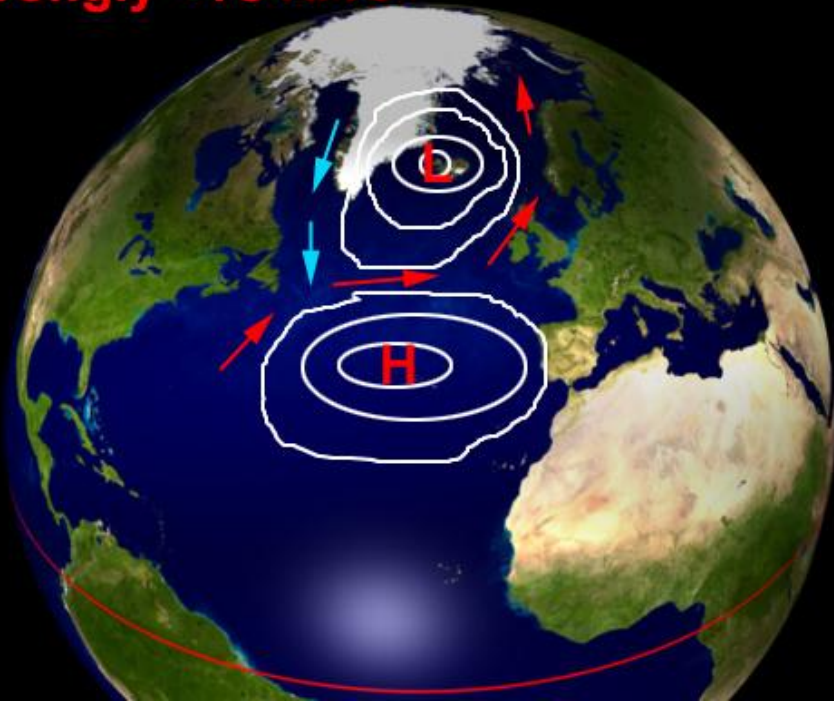
**negative AO - weak Polar Vortex**



# Oscylacja północno atlantycka NAO

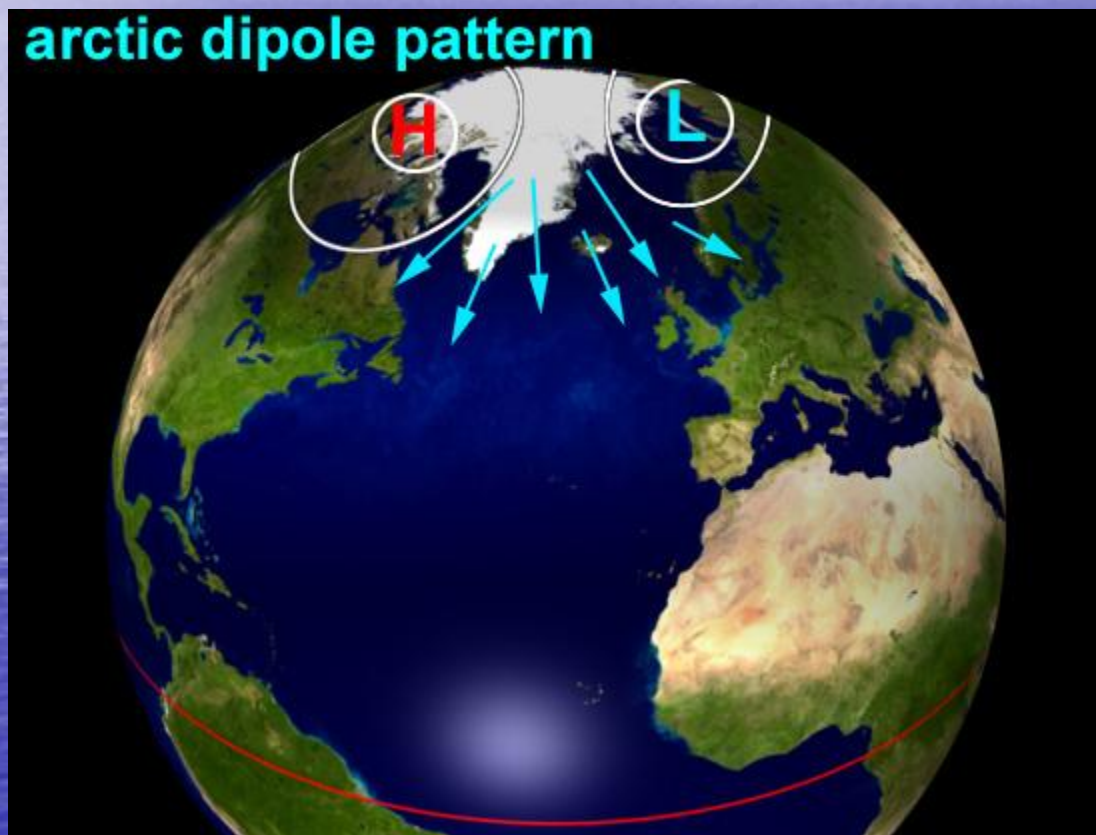
strongly +ve NAO

strongly -ve NAO

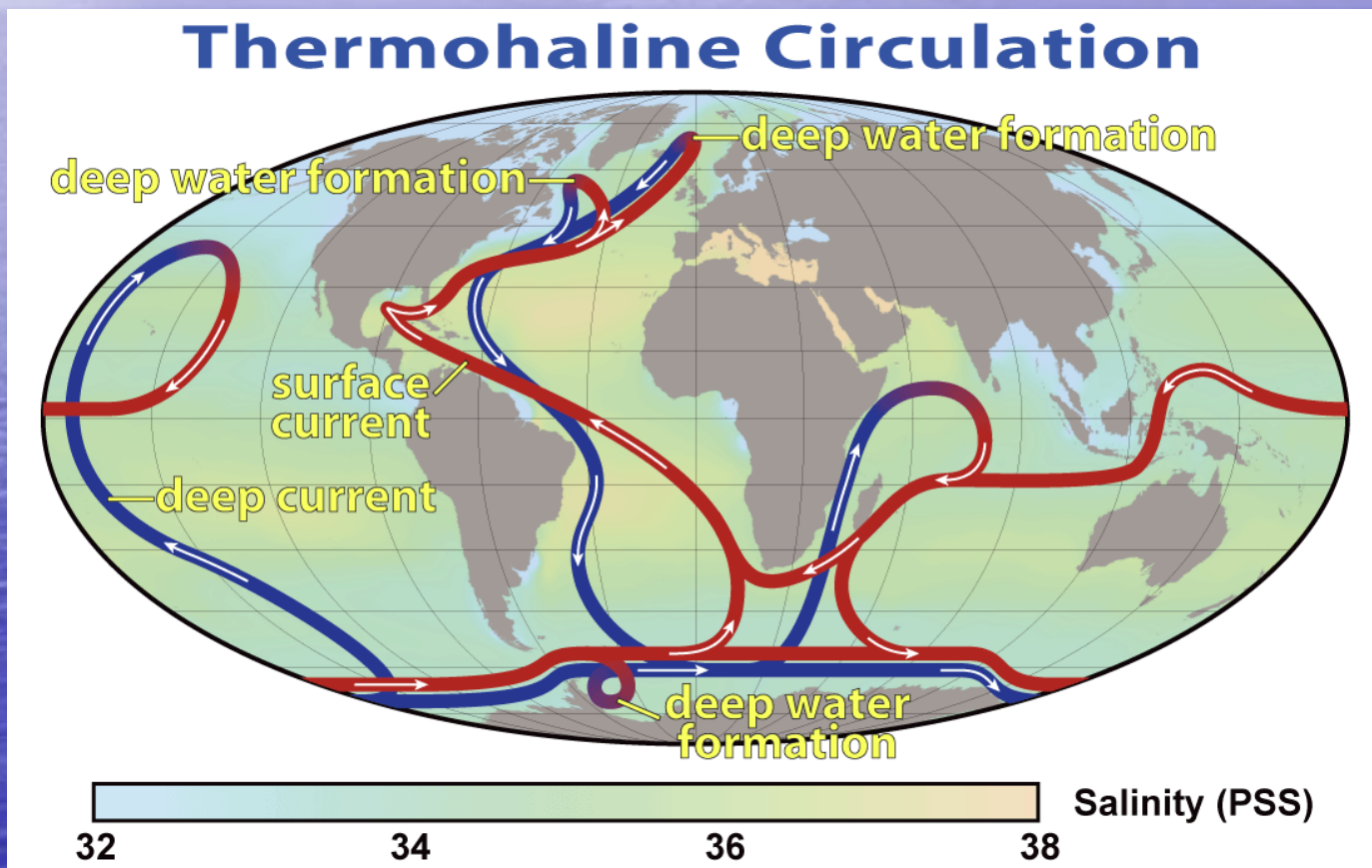




# Ekstremalna wymiana południkowa energii podczas dipolowego rozkładu ciśnienia w Arktyce

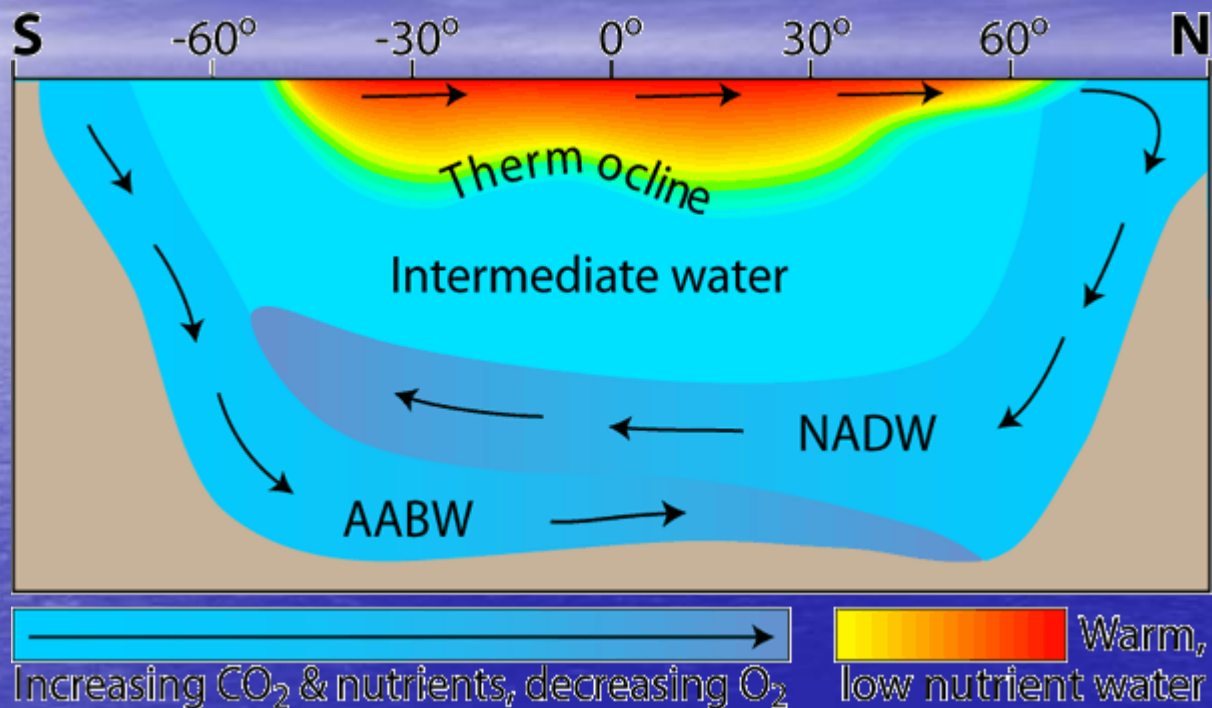


# Oceaniczna cyrkulacja termohalinowa

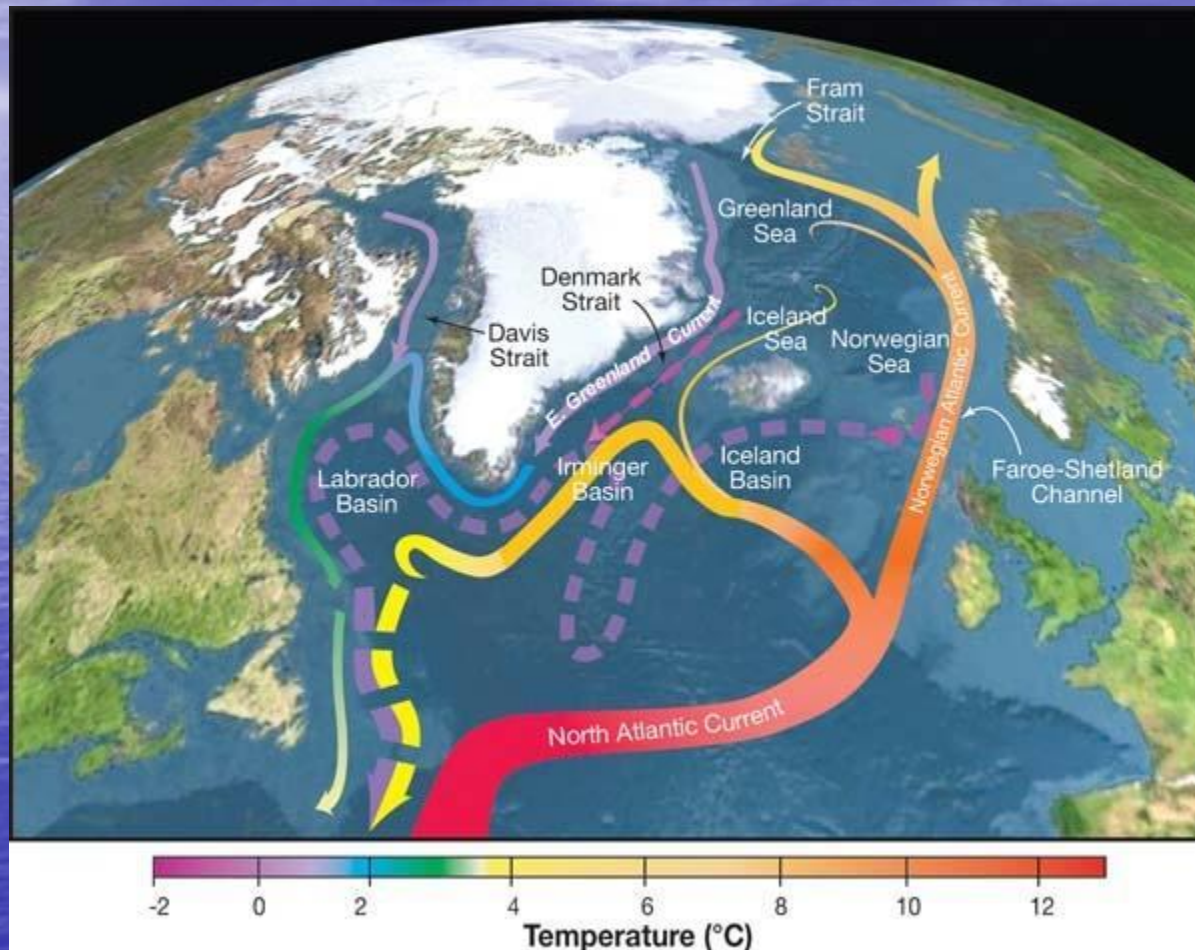




# Cyrkulacja termohalinowa – przekrój południkowy



# Cyrkulacja oceaniczna w obszarze polarnym

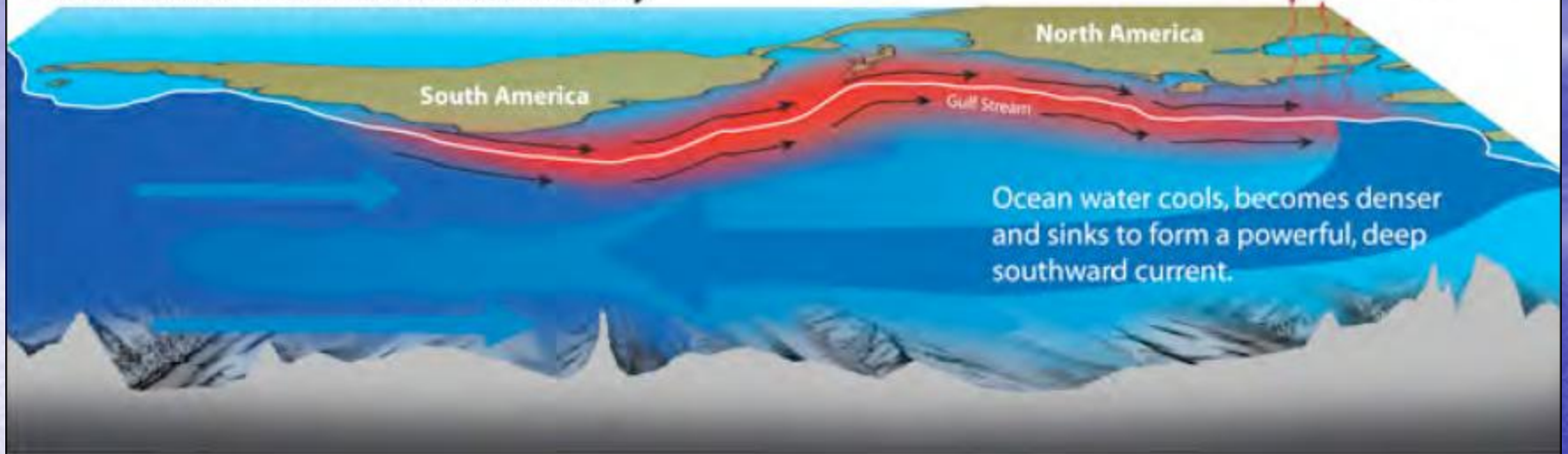


Curry/Woods Hole Oceanographic Institution

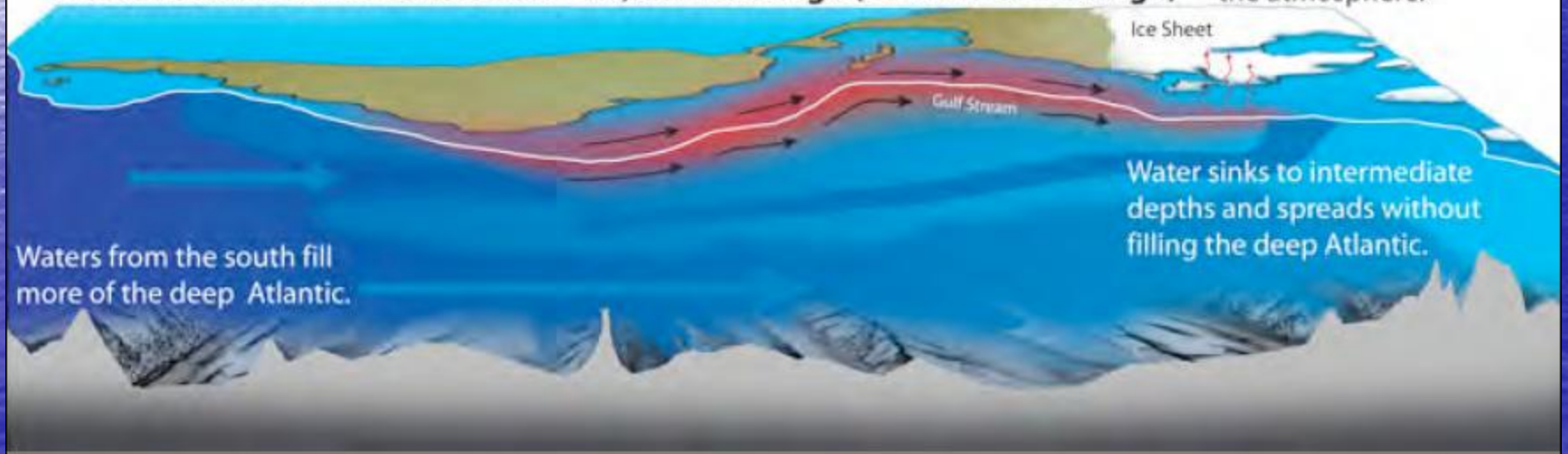
Instytut Geofizyki FUW



### North Atlantic Ocean Circulation Today



### North Atlantic Ocean Circulation ~20,000 Years Ago (Peak of Last Ice Age)



## CURRENT AFFAIR

Monitoring with the RAPID Climate Change array has revealed that the strength of the Atlantic Meridional Overturning Circulation current, which transports warm surface water to the poles (orange) and cool deep water to the tropics (blue), is declining.

Subpolar array  
scheduled for  
deployment in  
summer 2014.

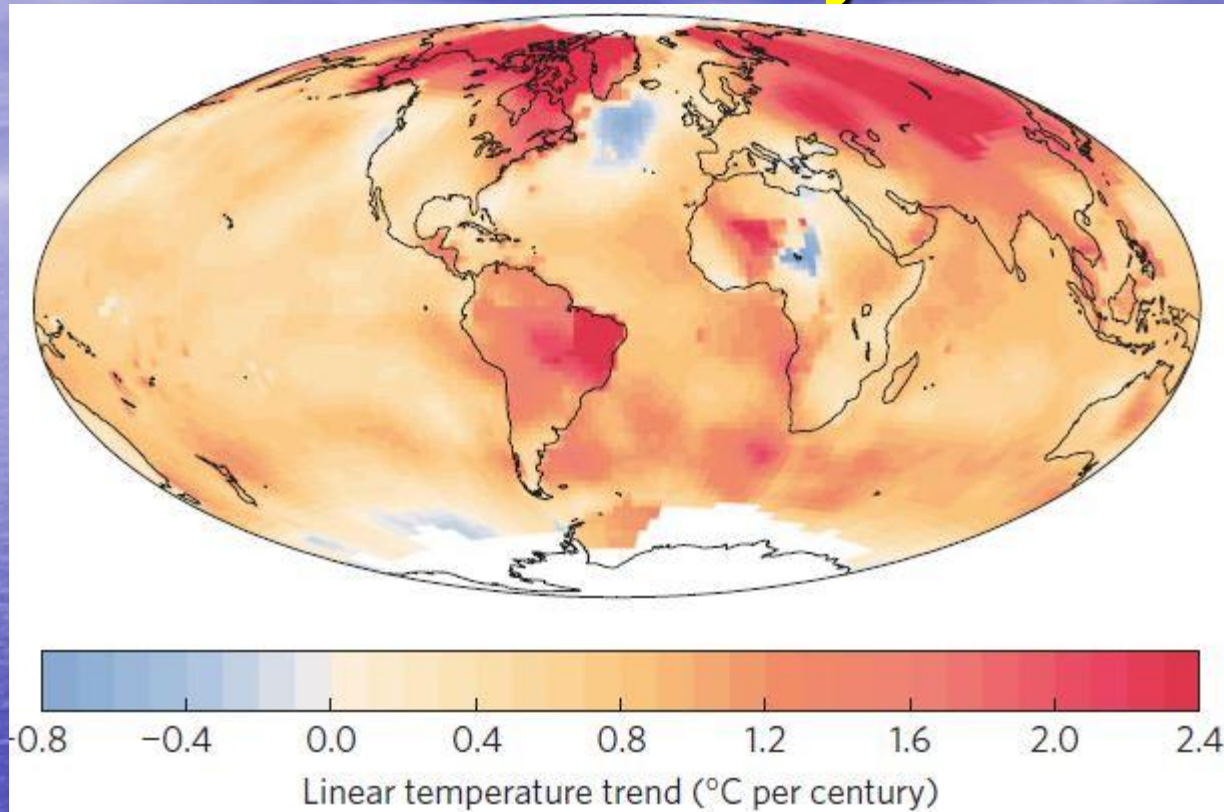
Existing RAPID  
monitoring array.

ATLANTIC  
OCEAN

<http://www.nature.com/news/oceans-under-surveillance-1.12949>



# Czy widoczne są zmiany w cyrkulacji oceanicznej?

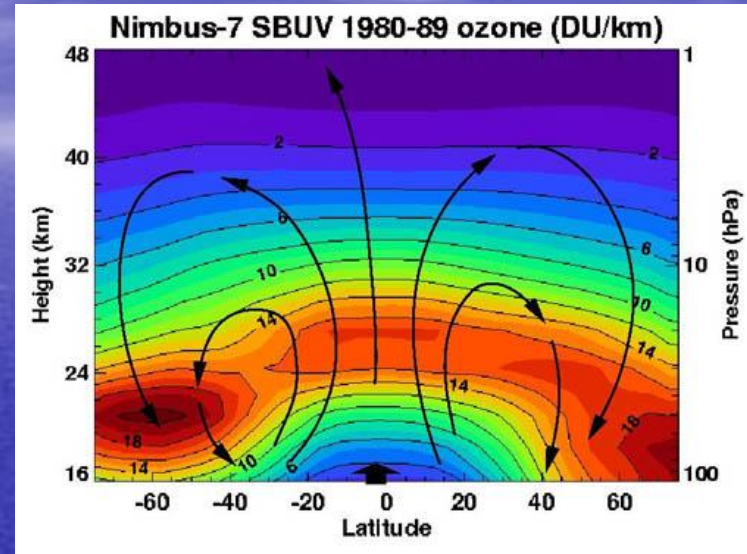
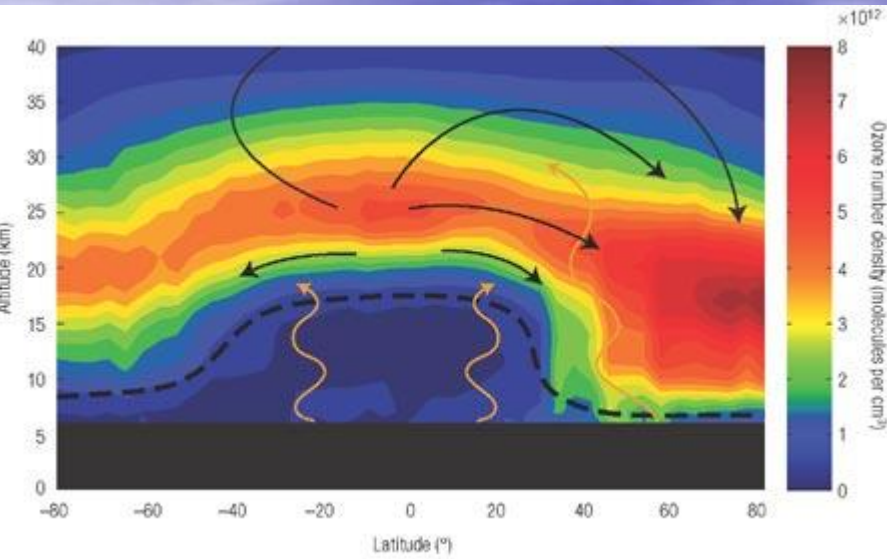


- Badania przeprowadzone przez Rahmstorf et al. (2015) wskazują na osłabianie Golfstromu, które nie było w takim stopniu prawdopodobnie obserwowane w ostatnim milenium
- Spowolnienie występuje w miejscu gdzie modele klimatu przewidują ochładzanie (północny Atlantyk)
- Być może jest to związane z globalnym ociepleniem (ale spraw nie jest do końca oczywista)

- Od 2004 r wraz z rozwojem badań oceanicznych (profilatory ARGO) naukowcy odnotowali osłabienie prądu oceanicznego oraz ochładzanie północnego Atlantyku.
- Naukowcy prowadzą debatę na temat przyczyn tego spowolnienia. Jedni uważają , że jest to związane z antropogeniczną działalnością człowieka a inny, że mamy do czynienia z naturalnym cyklem związanym z AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation)



# Cyrkulacja Brewera-Dobsona



- Wyniki symulacji numerycznych pokazują, że wzrost gazów cieplarnianych w atmosferze przyczynia się do intensyfikacji cyrkulacji Brewera-Dobsona

# Jakie skutki przynosi redukcja różnicy temperatury pomiędzy równikiem a biegunem?

- Osłabienie polarnego prądu strumieniowego
- Wzrost jego amplitudy fali Rossbiego (prąd strumieniowy ma tendencje do silniejszego meandrowania)
- Oba efekty mogą przyczyniać się do pojawiania się coraz większej ilości tzw. blokad, które charakteryzują się występowaniem ekstremalnych warunków meteorologicznych (susze, fale upałów i niskich temperatur itd.)
- Wyniki symulacji numerycznych pokazują tego typu oddziaływanie jednak ich amplituda zmian związane z globalnym ocieplaniem jest na ogół mniejsza niż zmienność naturalna



- Mamy jednak dwa przeciwne mechanizmy. Różnica temperatur w górnej troposferze staje się coraz większa co prowadzić powinno do wzrostu cyrkulacji strefowej i sztormów oraz przesunięcia frontu polarnego na północ
- Odwrotna sytuacja przy powierzchni ziemi sprzyja osłabianiu prądu strumieniowego oraz przesuwaniu się go na południe.
- Weryfikacja przesuwania się prądu strumieniowego jest dość trudna bo jego naturalna międzyroczna zmienność sięga 10 stopni.