

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 7:

Aerozol: wielka niewiadoma klimatyczna

Jacek Piskozub

Studium Doktoranckie IOPAN, semestr letni 2016/17 r.

<http://www.iopan.gda.pl/~piskozub/klimat/>

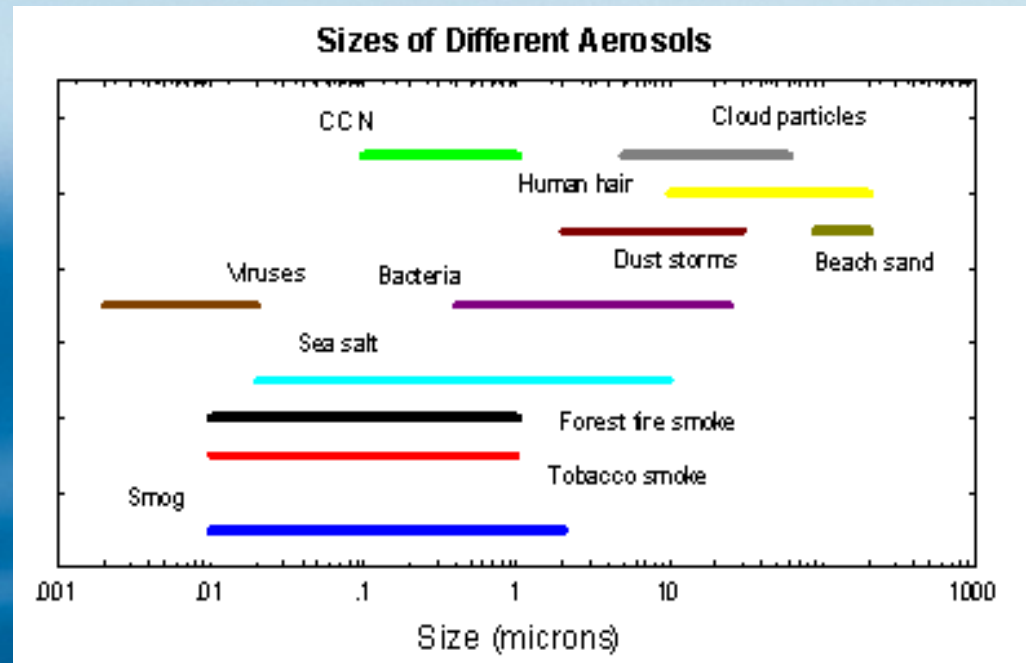
# Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów 2014/17

- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacjacja, zmienność “suborbitalna”*)
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (*stała słoneczna i wulkanizm*)
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (*cyrkulacja termohalinowa*)
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadalnej (AMO, NAO, PDO)
- ✓ Tropiki a zmienność klimatu (*ENSO, huragany, monsuny*)
- ✓ **Aerozol: wielka niewiadoma klimatyczna**
- ✓ Gazy o znaczeniu klimatycznym (*cykl węgla, CO<sub>2</sub>, metan, DMS*)
- ✓ Globalne ocieplenie a ocean (*zmienność antropogeniczna*)
- ✓ Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych



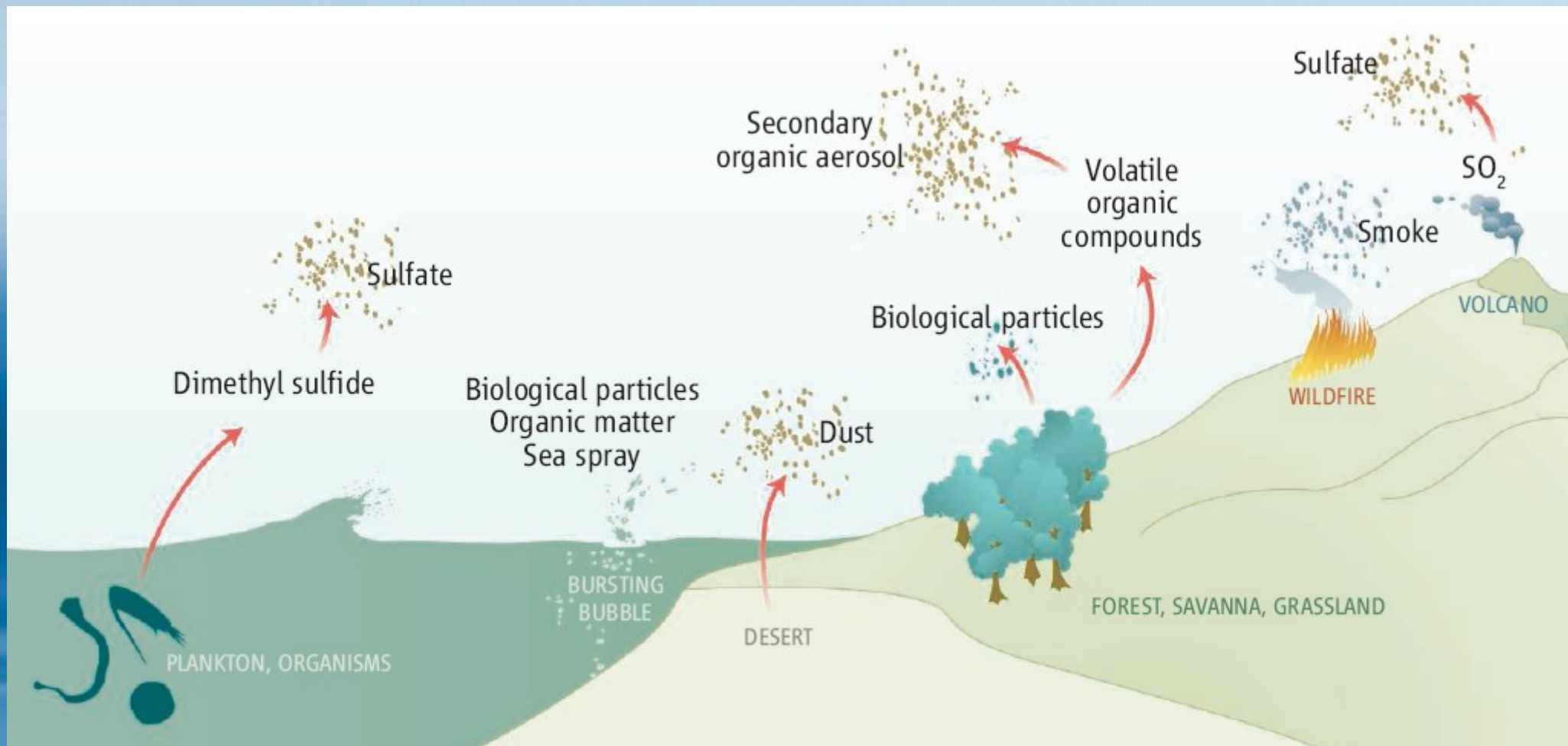
# Aerozole: definicja

Aerozole to zawiesina stałych i ciekłych cząstek w gazie. Z przyczyn historycznych za aerozol nie uważa się kropli wody i kryształków lodu w chmurach oraz opadach. Chmury potrzebują jednak cząstek aerozolu jako „zaczynu” (jąder kondensacji).



Cząstki aerozolu atmosferycznego przebywają w atmosferze od minut dla największych cząstek do lat dla najmniejszych. Źródłem *pierwotnego aerozolu* (emitowanego z powierzchni ziemi lub morza) obok procesów naturalnych jest przemysł, transport i rolnictwo (*aerozol antropogeniczny*). Bezpośrednio z kondensacji gazów atmosferycznych, głównie związków siarki, pochodzi *aerozol wtórny*, drobne cząstki submikronowe, jedno ze źródeł jąder kondensacji chmur (CCN).

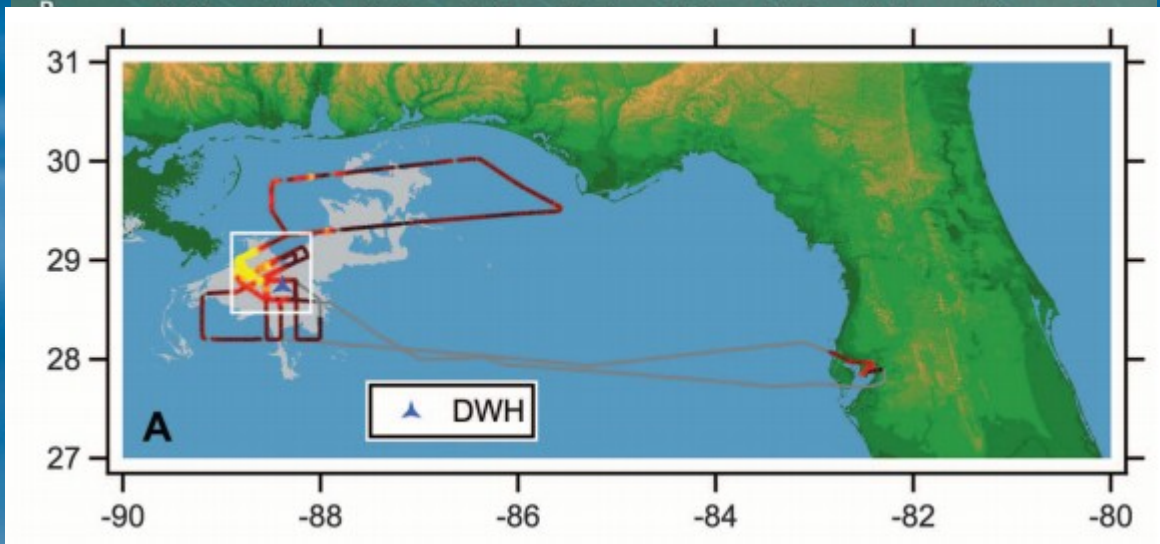
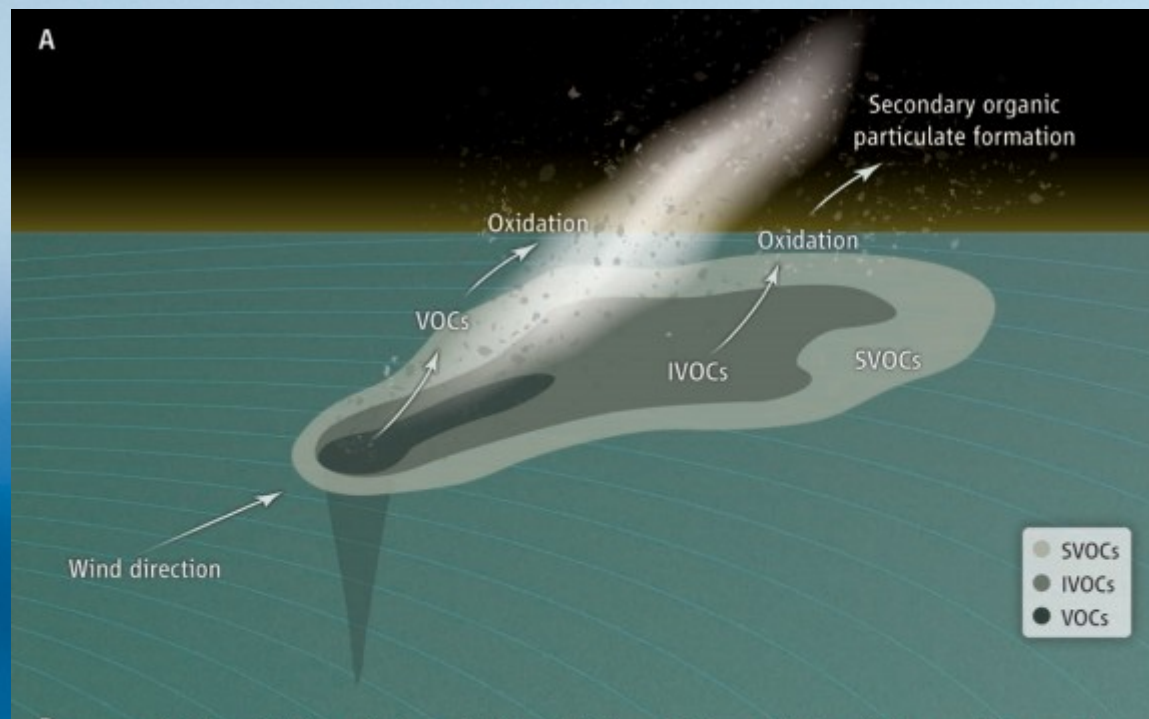
# Naturalne źródła aerozolu



Naturalne źródła aerozolu zarówno na morzu jak i na lądzie rzadko dostarczały więcej niż 50-200 jąder kondensacji chmur na cm<sup>3</sup> (cząstki > 90 nm). Obecnie niewiele jest rejonów z tak małą ilością aerozolu (głównie odległe rejony oceanów szczególnie na półkuli południowej).



# Tworzenie się wtórnego aerozolu



Aerozol wtórny tworzy się w atmosferze z gazów (i par) związków organicznych pochodzących o oceanu (oraz roślinności lądowej).

Niedawny wyciek ropy w Zatoce meksykańskiej z platformy Deepwater Horizon dostarczył naturalnego laboratorium tworzenia się wtórnego aerozolu z par węglowodorów: bardziej lotnych bliżej wycieku i coraz mniej lotnych im dalej od niego. Na dole mapka wycieku i trasy samolotu mierzącego aerozol.



# Badania nad tworzeniem się wtórnego aerozolu



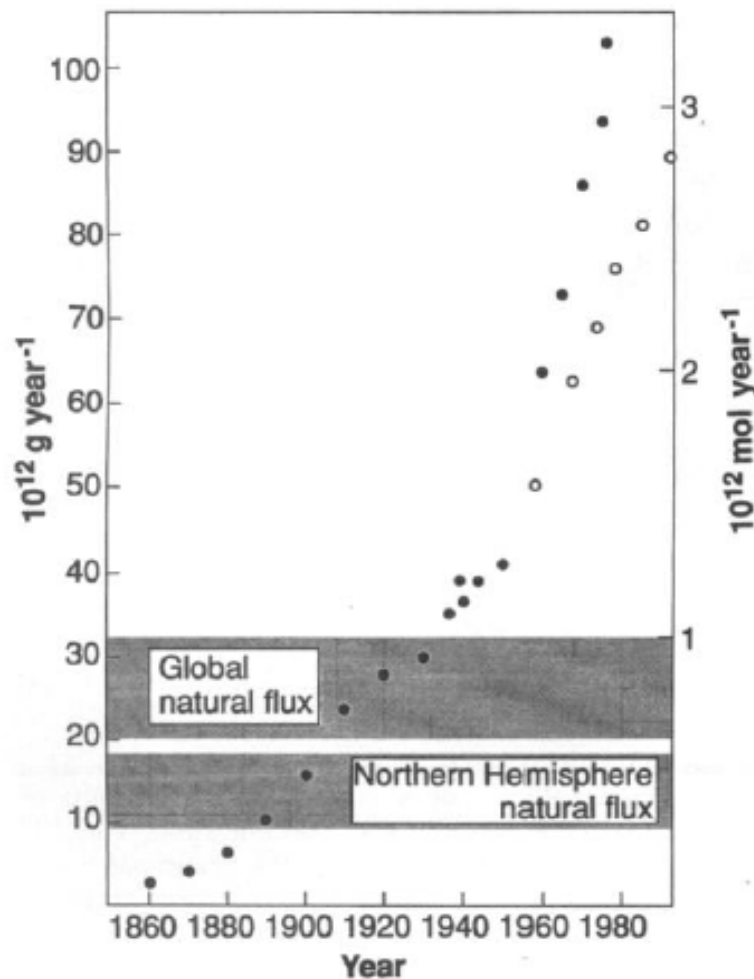
**From gases into particles.** (A) Atmospheric nucleation is represented for sulfuric acid (sulfur atoms in yellow) and organic molecules (carbon atoms in green) joining to form a critical cluster, which grows to become an aerosol particle (8). (B) The boreal forest at Hyytiälä, Finland, where Kulmala *et al.* performed detailed field measurements of aerosol formation. (C) The CLOUD experimental chamber at CERN, Geneva, provides complementary laboratory studies of aerosol formation.

*Andreae 2013 (Science)*



## „Direct aerosol effect (forcing)”

- rozpraszanie światła słonecznego przez aerozol



Aerozol (szczególnie zawierający związki siarki) rozprasza światło słoneczne skierowując jego część w kosmos (zwiększając albedo Ziemi) co prowadzi do ochłodzenia powierzchni oraz atmosfery. Emisja związków siarki przez człowieka działa analogicznie do wybuchów wulkanów.

Na początku lat 1990-ch uważano to za jedyny klimatyczny efekt aerozolu, który - jak wówczas oceniano - mógłby zrównoważyć efekt gazów cieplarnianych.

*Emisja związków siarki do atmosfery ziemskiej (wg. dwóch ocen) – stan wiedzy na 1992 r. “Wymuszanie” związane z aerozolem oceniano na  $1 \text{ W/m}^2$*

Obecnie wiemy, że jest to jedynie jeden z kilku efektów klimatycznych aerozolu i nazywamy go **aerozolowym wymuszaniem bezpośrednim**.

*Charlson et al. 1992 (Science)*

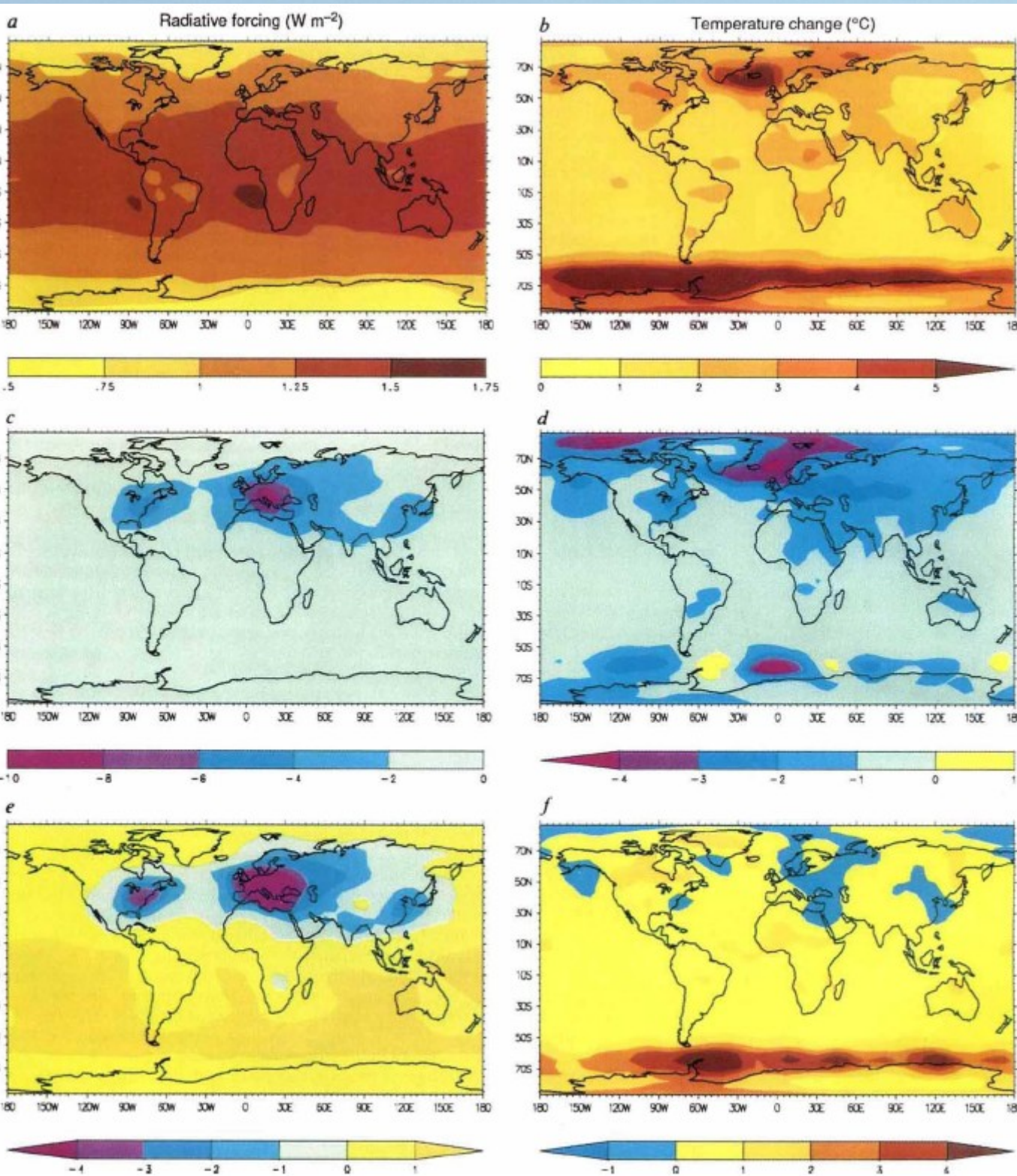


# Równowaga?

Ocena z roku 1994: wymuszanie radiacyjne (po lewej) i zmiany temperatury (po prawej) związane z gazami cieplarnianymi (góra), aerozolem (środek) i sumaryczne (dół).

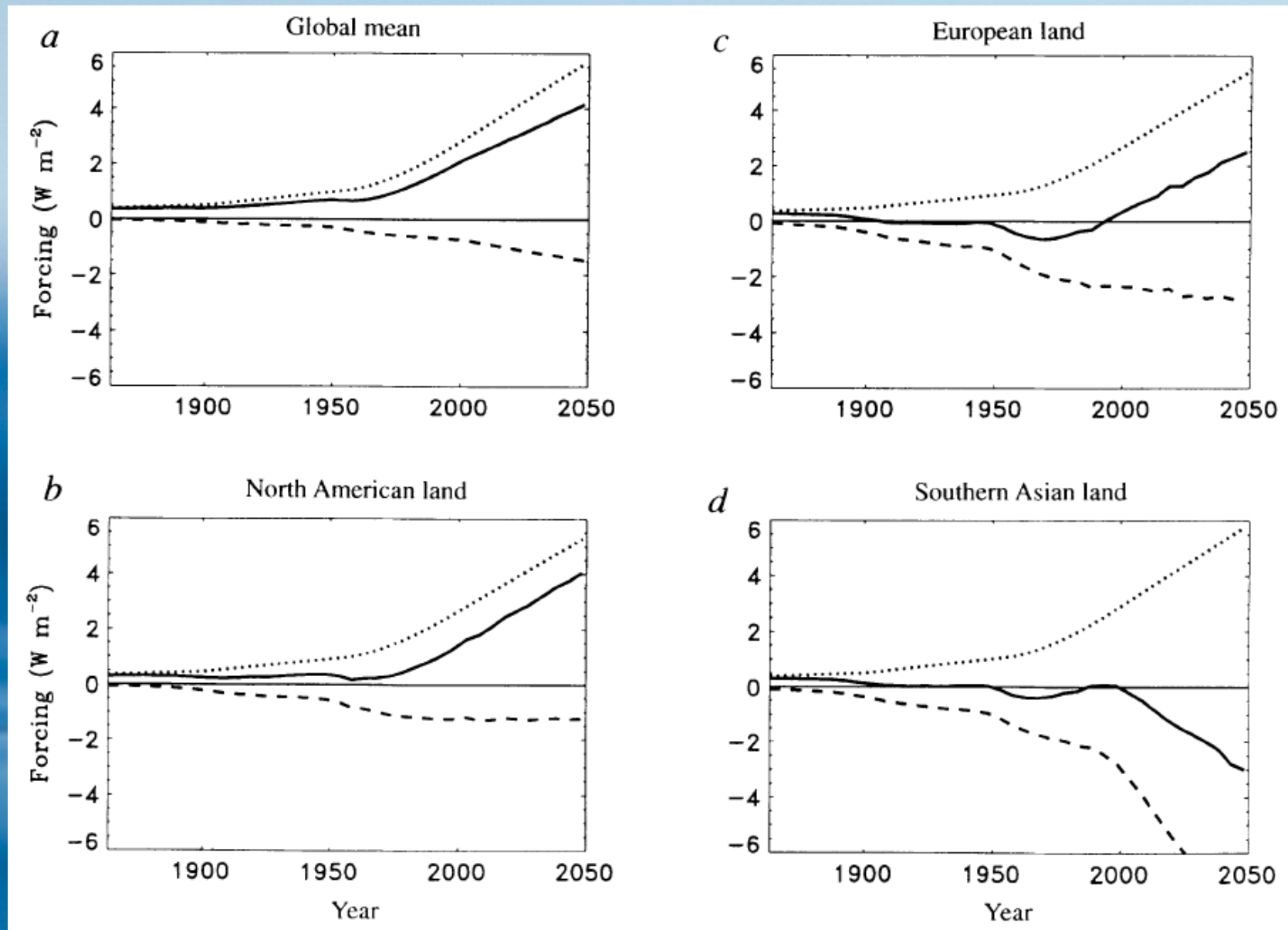
Ówczesna ocena obu “wymuszeń” (+1.26  $\text{W/m}^2$  dla gazów cieplarnianych i -0.95  $\text{W/m}^2$  dla aerozolu zawierającego siarkę) dawała nadzieje na to, że przynajmniej *na razie* nie zmieniamy klimatu w istotny sposób.

*Taylor & Penner 1994 (Nature)*





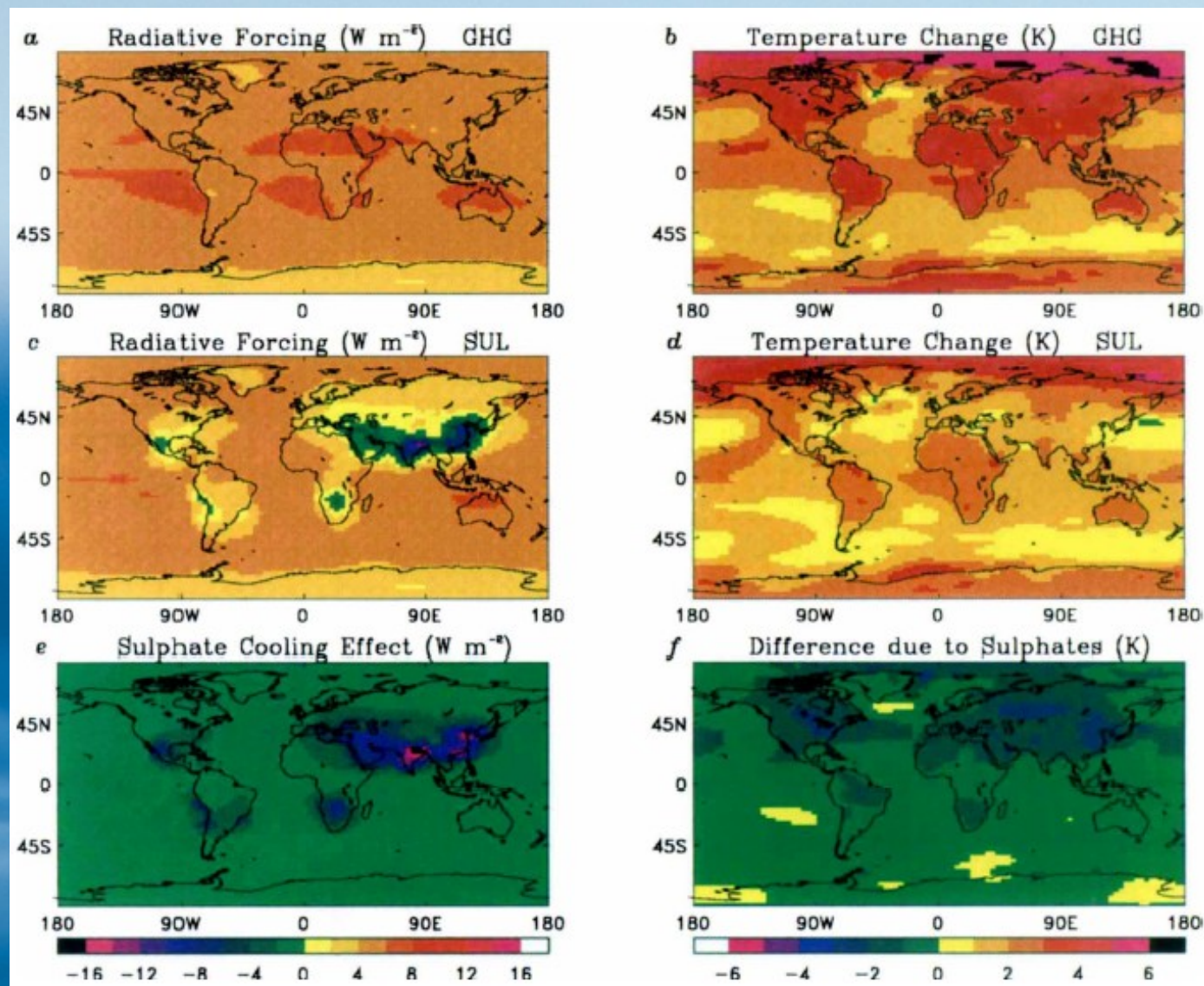
# Równowaga jednak nie trwała



Nawet bez uwzględnienia innych efektów niż bezpośredni wymuszanie aerozolowe (kreski) nie miało w przyszłości zrównoważyć gazów cieplarnianych (kropki). Suma (linia ciągła) jest w tej prognozie ujemna tylko w Azji Południowej.

*Mitchell 1995 (Nature)*

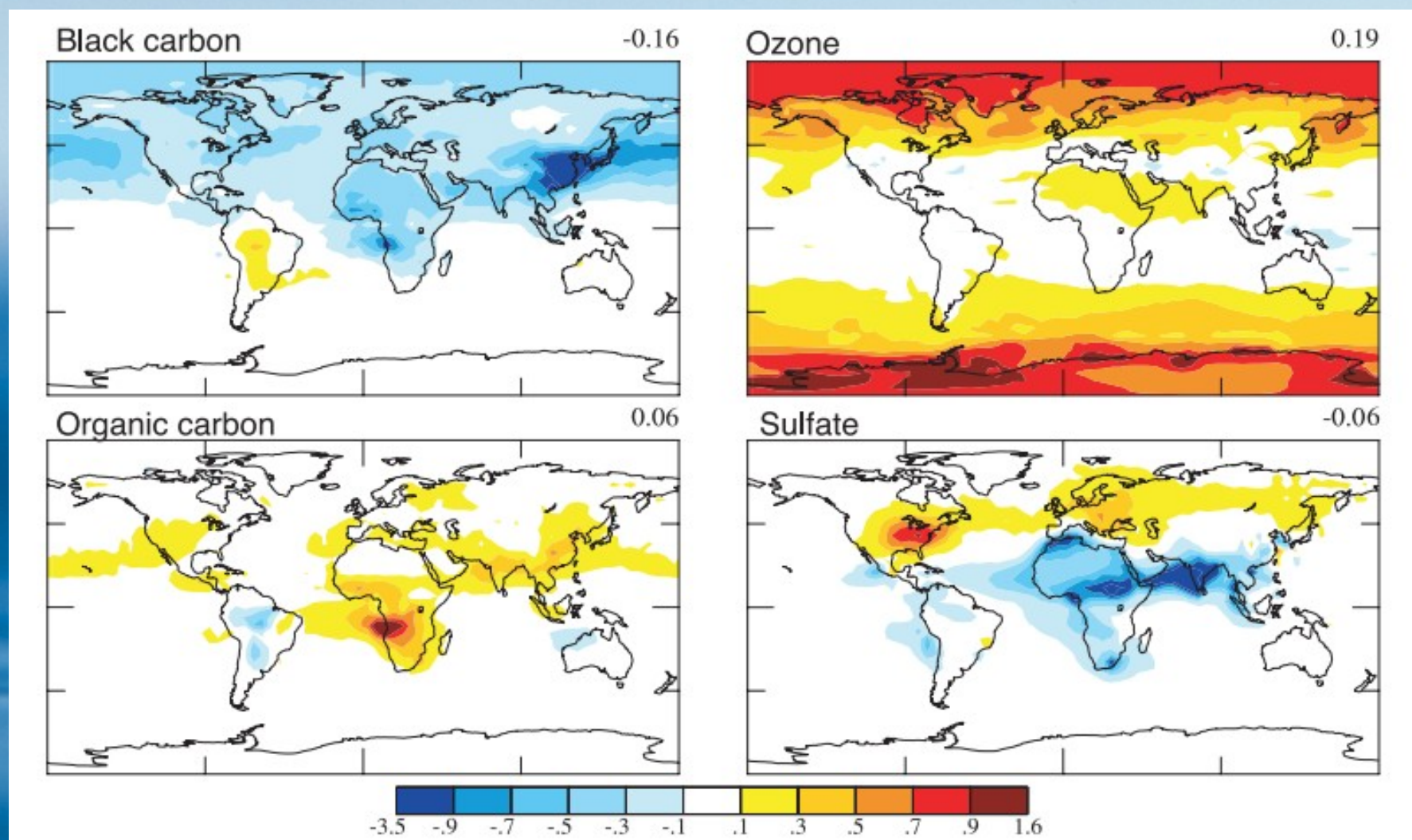
# Rozkład geograficzny (ta sama prognoza)



Wymuszenie radiacyjne i zmiany temperatury spowodowane przez gazy cieplarniane (góra) aerozolowe (dół) i ich suma (uwaga: środek) dla lat 2030-2050. Uwzględniony tylko efekt bezpośredni (chłodzący) aerozolu.



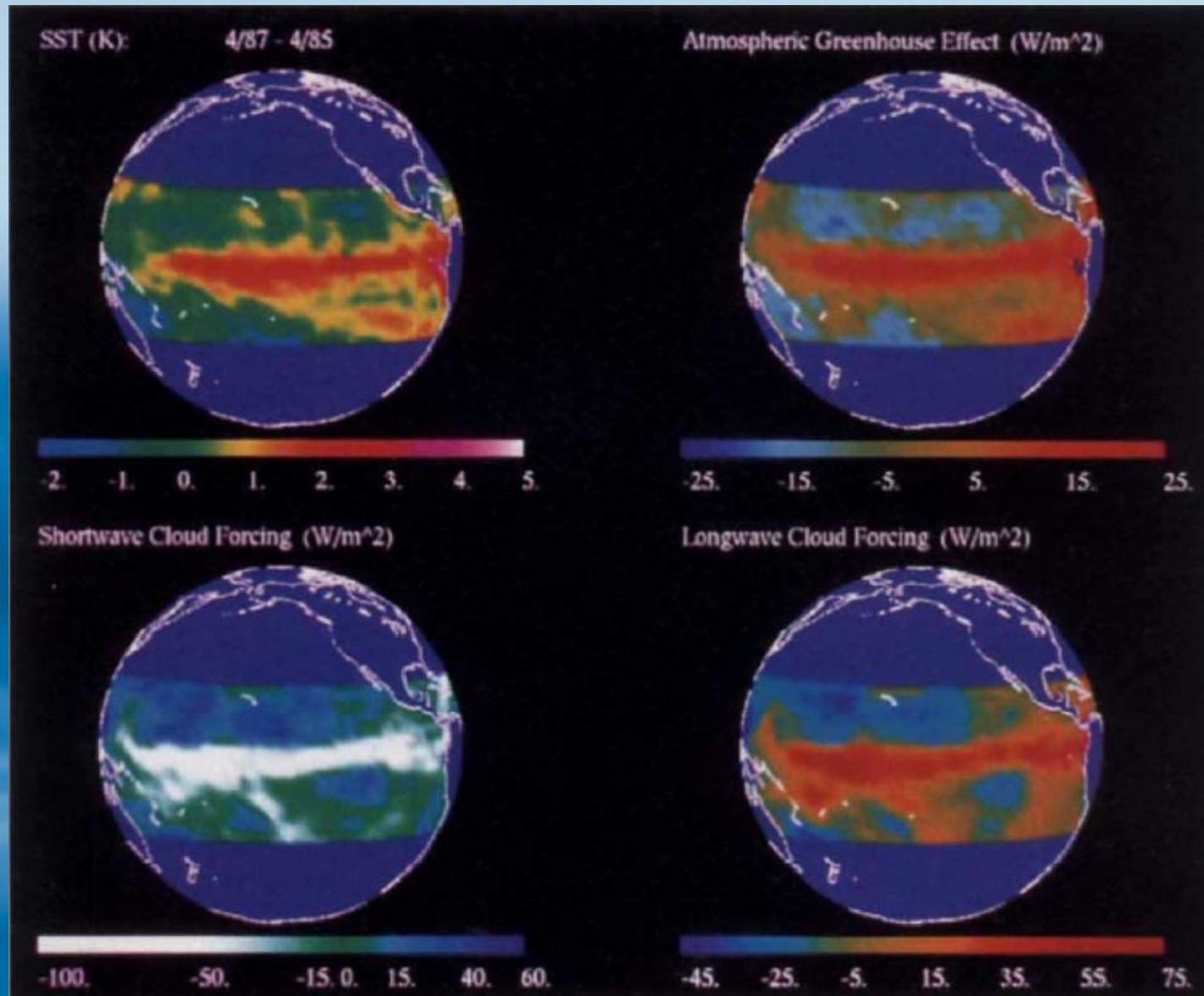
# Nowsza prognoza efektu radiacyjnego związków o krótkim okresie trwania w atmosferze



Dodatkowe wymuszenie radiacyjne przewidywane na 2010 rok (różnica wymuszeń 2050 – 2000). Pokazano rozkład geograficzny dla najważniejszych związków o krótkim życiu w atmosferze oraz średnią globalną (wszystko w  $\text{W/m}^2$ ).

*Shindell et al. 2007 (JGR)*

# Chmury też mają znaczenie



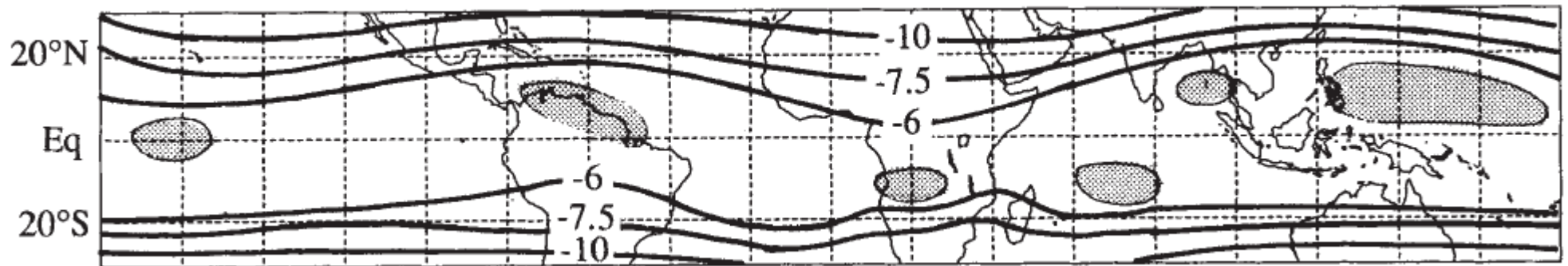
Zmiany temperatury, atmosferycznego efektu cieplarnianego (para wodna), albedo chmur (rozpraszanie) i efektu cieplarnianego z nimi związanego (absorpcja) podczas El Niño w 1987 roku.

*Ramanathan & Collins 1991 (Nature)*



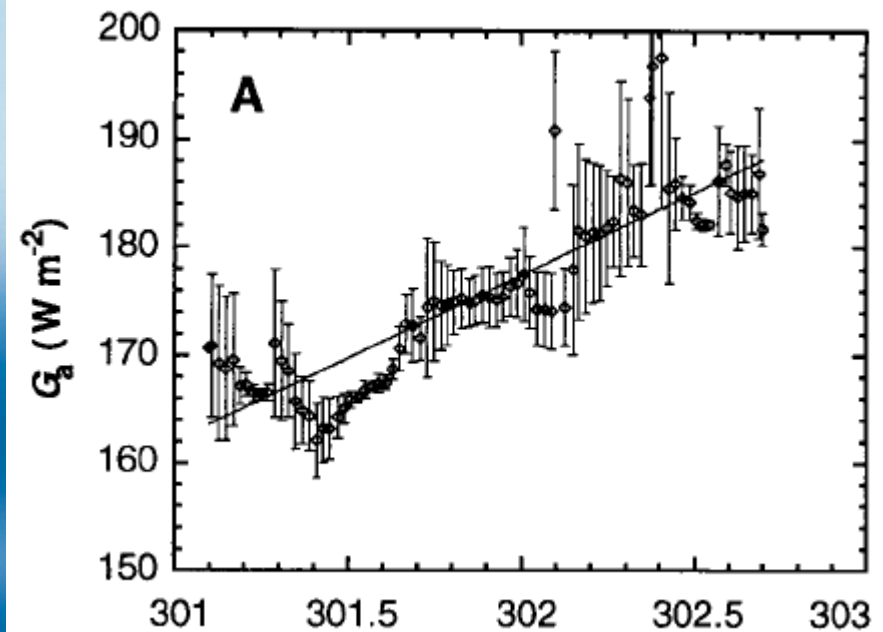
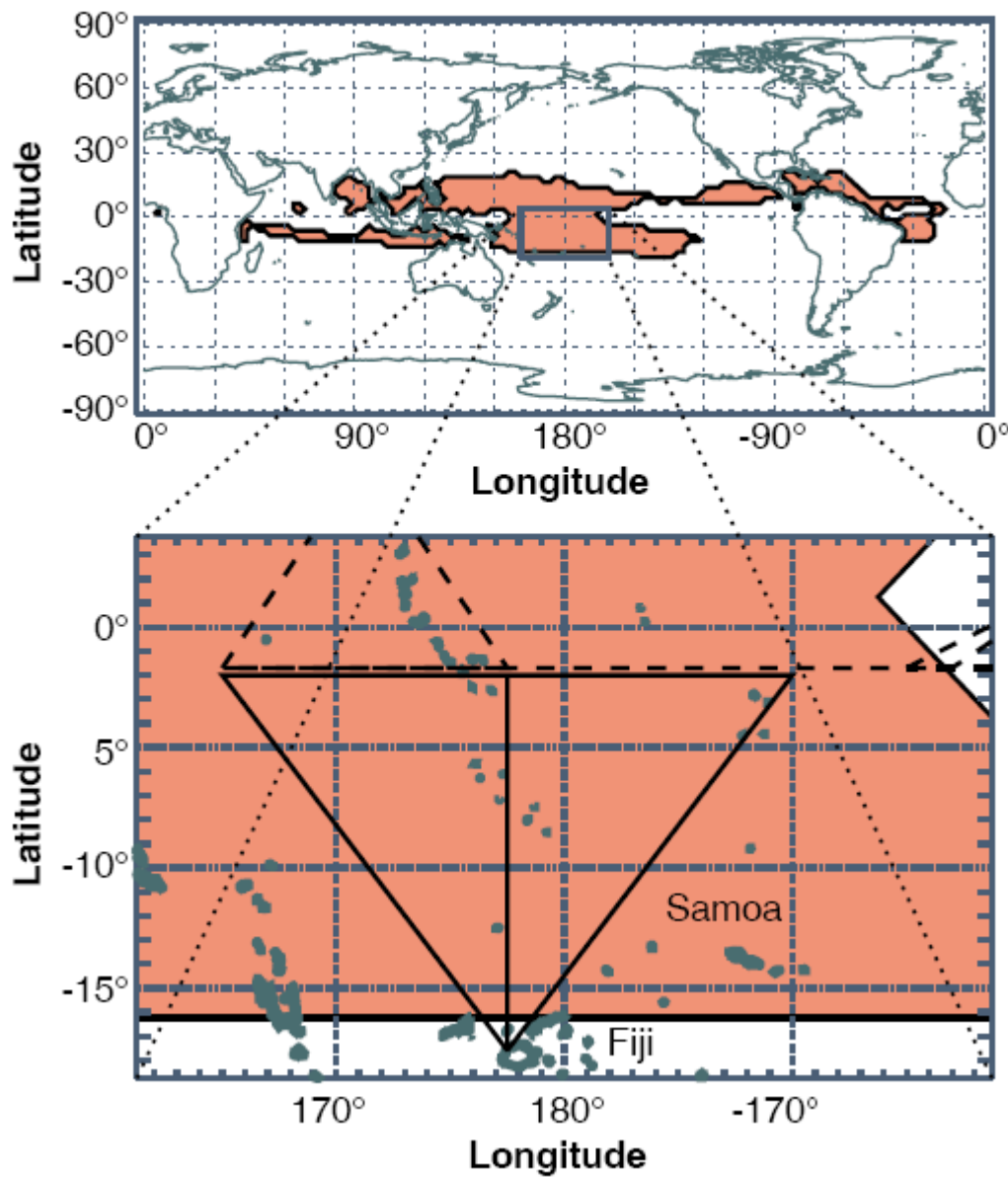
# Czy chmury są termostatem tropików?

Nigdzie na świecie temperatura powierzchni oceanu nie przekracza  $30^{\circ}\text{C}$  ( $303\text{ K}$ ). Ramanathan i Collins (1991) zaproponowali chłodzenie przez cirrusy jako mechanizm termostatu tropików. Fu i inni (1992) pokazali, że pokrycie chmurami wysokimi nie koreluje z temperaturą tropików. Wallace (1992) zaoferował konkurencyjny mechanizm: wzmożoną cyrkulację na miejscami gorętszego oceanu. Niezwykła równomierność temperatur górnej troposfery na wysokości odpowiadającej ciśnieniu 500 hPa - średnio około 5 km- (rysunek poniżej, szare obszary mają temperaturę pomiędzy  $-5^{\circ}$  a  $-4^{\circ}\text{C}$ ) z różnicami mniejszymi niż 2 K (wobec ok 10 K przy powierzchni morza) świadczy o niezwykle skutecznym mechanizmie odprowadzania energii z powierzchni mórz tropikalnych.



*Ramanathan & Collins 1991 (Nature); Fu et al. 1992 (Nature); Wallace 1992 (Nature);*

# Efekt super-cieplarniany nad gorącym oceanem.



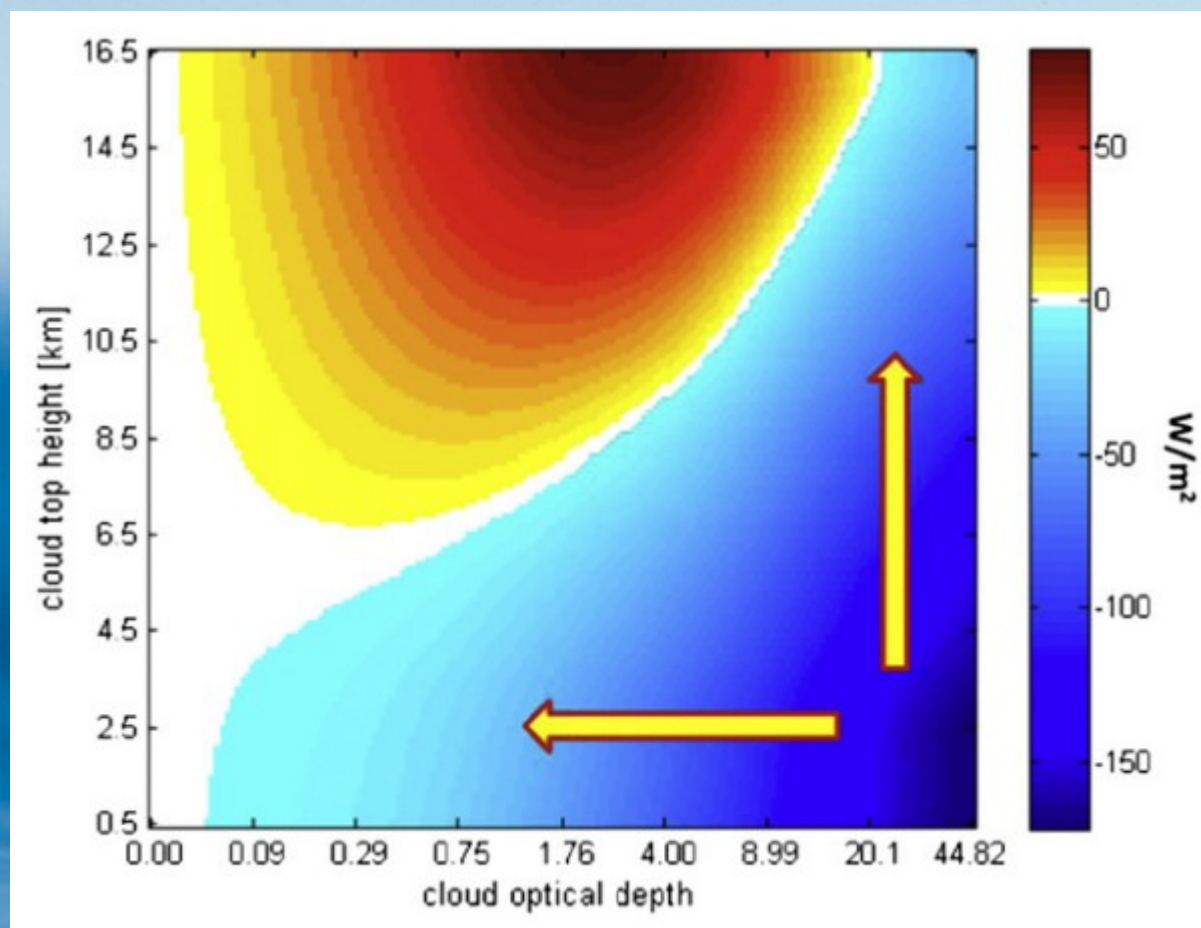
Badania przeprowadzone nad Pacyfikiem z samolotów meteorologicznych wykazały, że nad obszarami bezchmurnymi para wodna powoduje wzrost lokalnego efektu cieplarnianego o 13-15  $\text{W/m}^2$  na każdy stopień wzrastającej temperatury morza.

Trasy lotów podczas badań i obszary morza z temperaturą stale przekracza 298 K (25° C)

*Valero et al. 1997 (Science)*

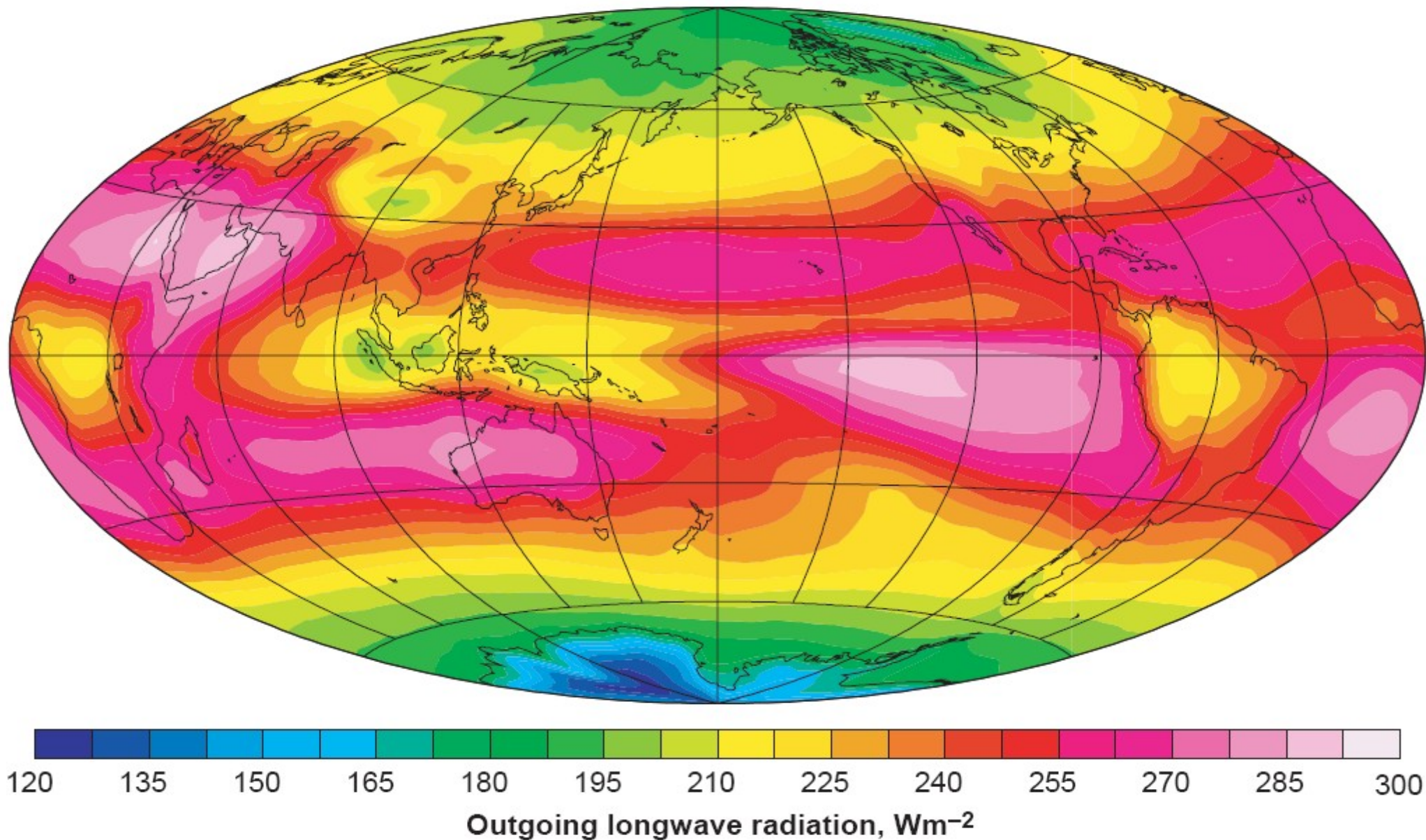


# Efekt chłodzący / grzejący chmur



Chmury niskie („ciepłe”) chłodzą powierzchnię (odbijają promieniowanie krótkofalowe i wypromieniowują długofalowe prawie tak skutecznie jak powierzchnia. Chmury wysokie („zimne”) ogrzewają, szczególnie jeśli nie są zbyt grube przepuszczając lepiej promieniowanie krótkofalowe niż długofalowe i wypromieniowując w kosmos mniej długofalowego niż powierzchnia.

# Efekt cieplarniany chmur

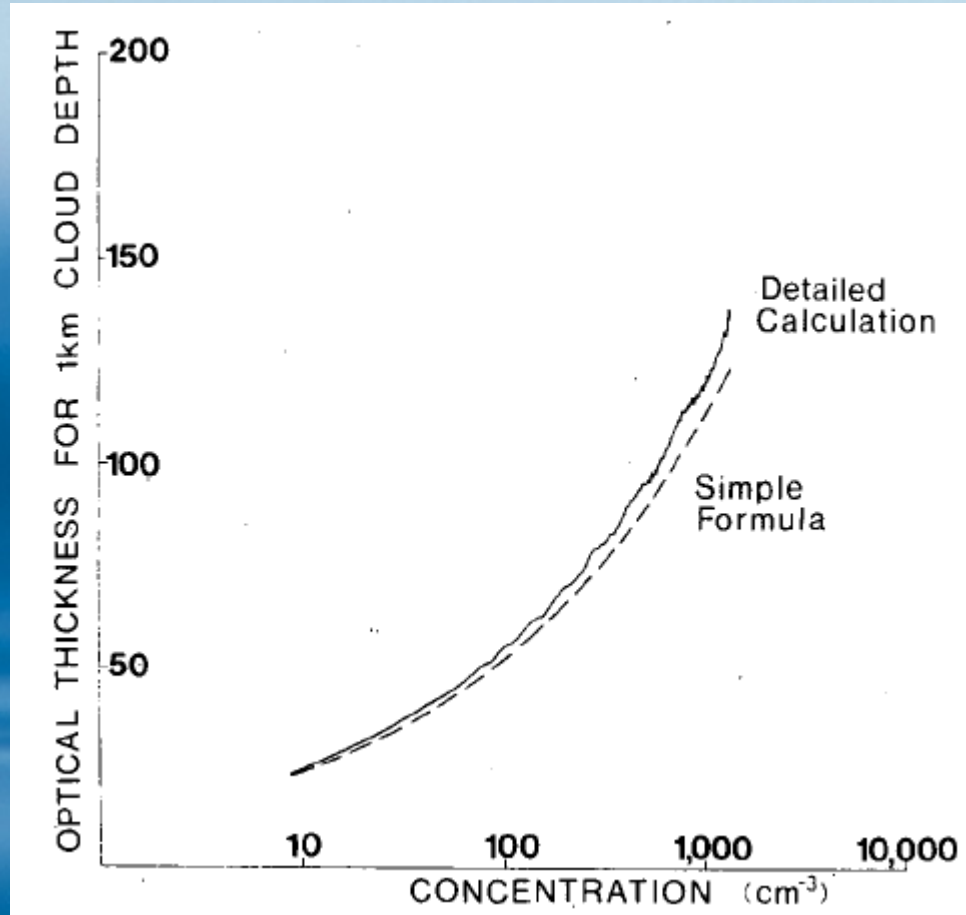


Pokrycie chmurami części obszarów tropikalnych powoduje zmniejszenie emisji długofalowej (podczerwonej) zwiększając tym samym efekt cieplarniany nad częścią tropików (tu o kolorze żółtym i zielonym).

*Hartmann 2002 (Science)*



## 1<sup>st</sup> aerosol indirect effect (forcing) wzrost grubości optycznej chmur



*Ta sama ilość wody w chmurze wywołuje większą grubość optyczną chmur (a zatem większe albedo) przy większej ilości mniejszych kropeł.*

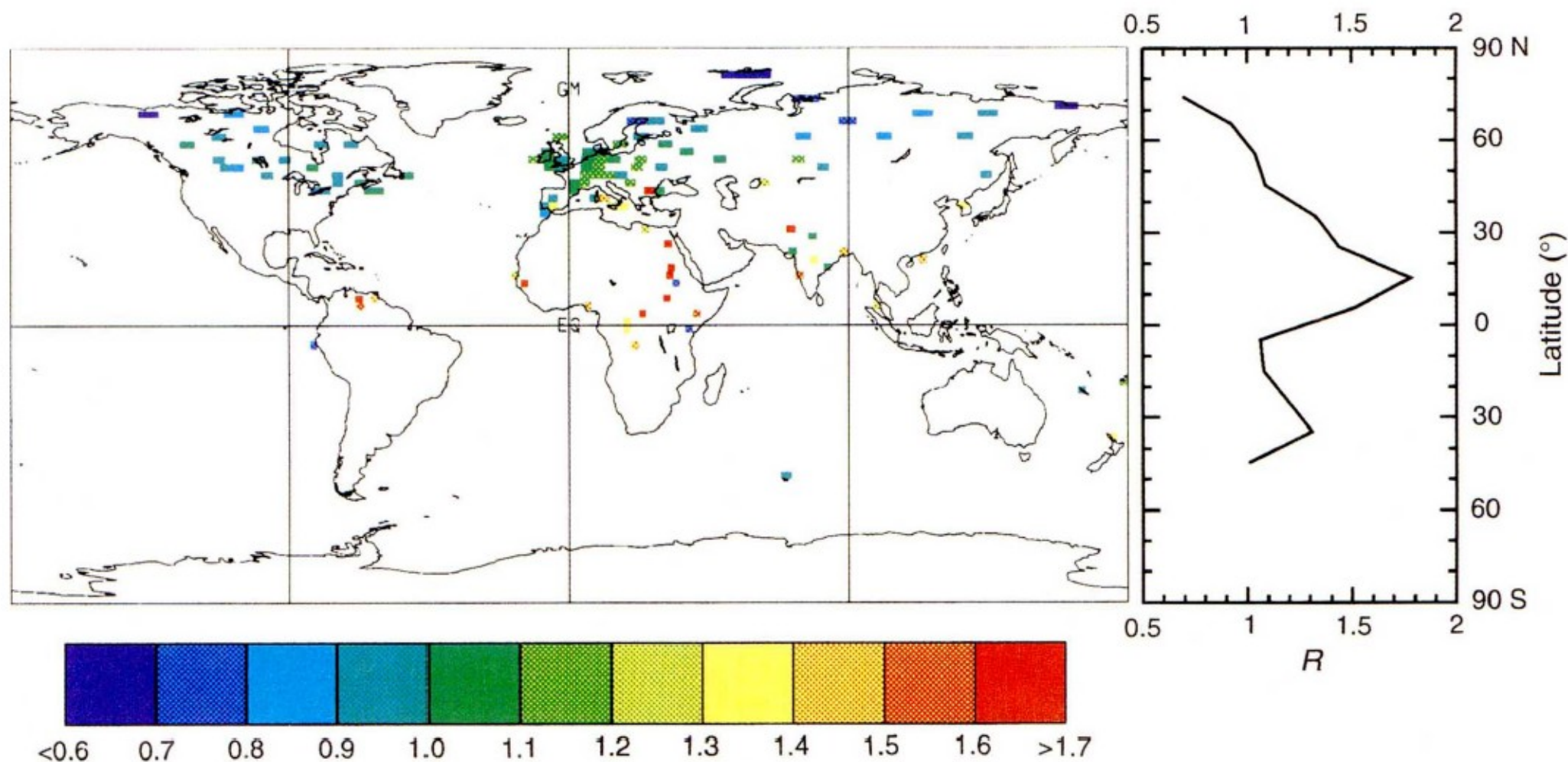
Większa ilość jąder kondensacji powoduje większą koncentrację kropelek w chmurze. Ponieważ dla cząstek o małym promieniu  $r$  efektywność rozpraszania jest większa. Dlaczego?

Rozpraszanie jest w przybliżeniu proporcjonalne do pola przekroju  $\sim r^2$  a masa do objętości  $\sim r^3$  zatem wielkość rozpraszania na jednostkę masy (a zatem grubość optyczna chmury o danej masie) jest proporcjonalne do  $r^2/r^3 = 1/r$

Aerozol zatem zwiększa grubość optyczną (a zatem i albedo) chmur dodatkowo chłodząc powierzchnię ziemi. Dość długo efekt ten uważano jednak za mało znaczący.

*Twomey 1977 (J. Atmospheric Sci.)*

## W dodatku odkryto, że... absorbują światło widzialne



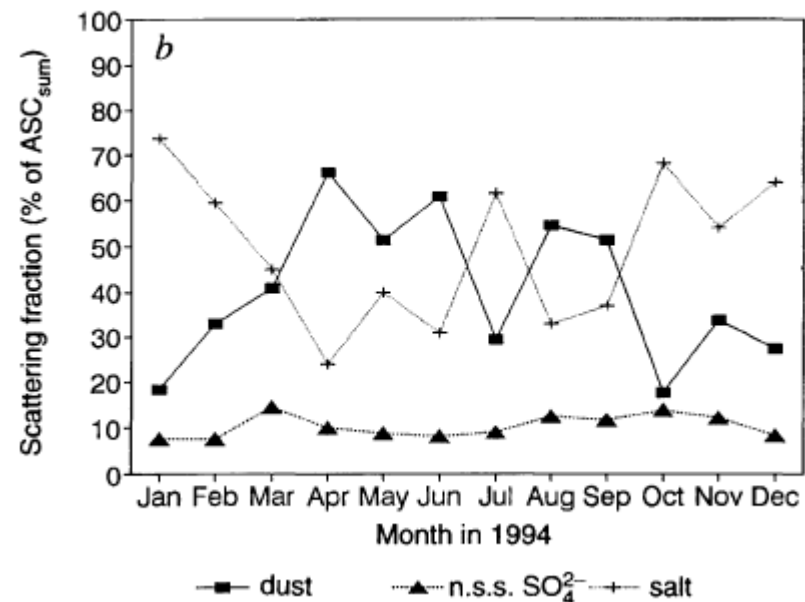
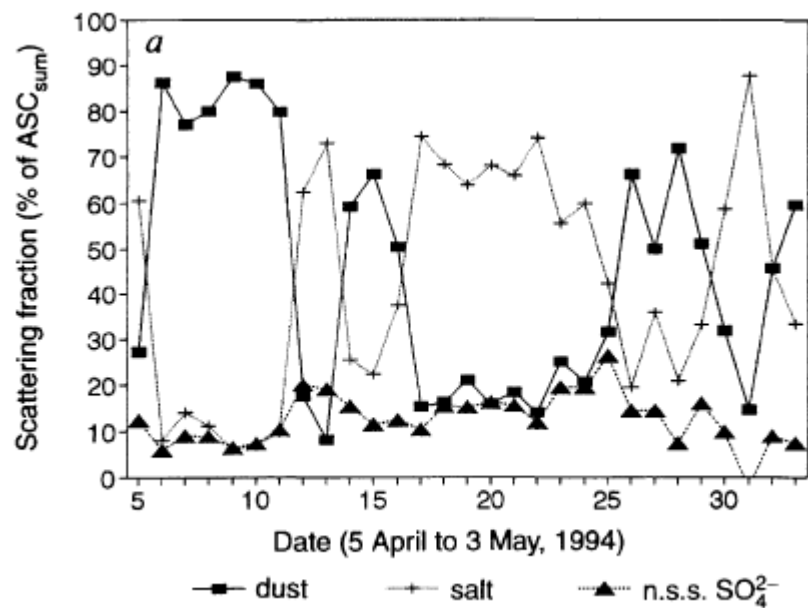
W połowie lat pięćdziesiątych okazało się, że chmury (przynajmniej w niektórych rejonach świata – na rysunku dla  $R > 1$ ) absorbują w zakresie widzialnym mimo, że woda jest przezroczysta. Kto winny? Aerozol.

*$R$  jest tutaj stosunkiem wymuszania radiacyjnego nad i pod chmurami – miarą absorpcji pomiędzy powierzchnią ziemi i szczytem atmosfery.*

*Li, Barker & Moreau 1995 (Nature)*



# Aerozol to nie tylko związki siarki



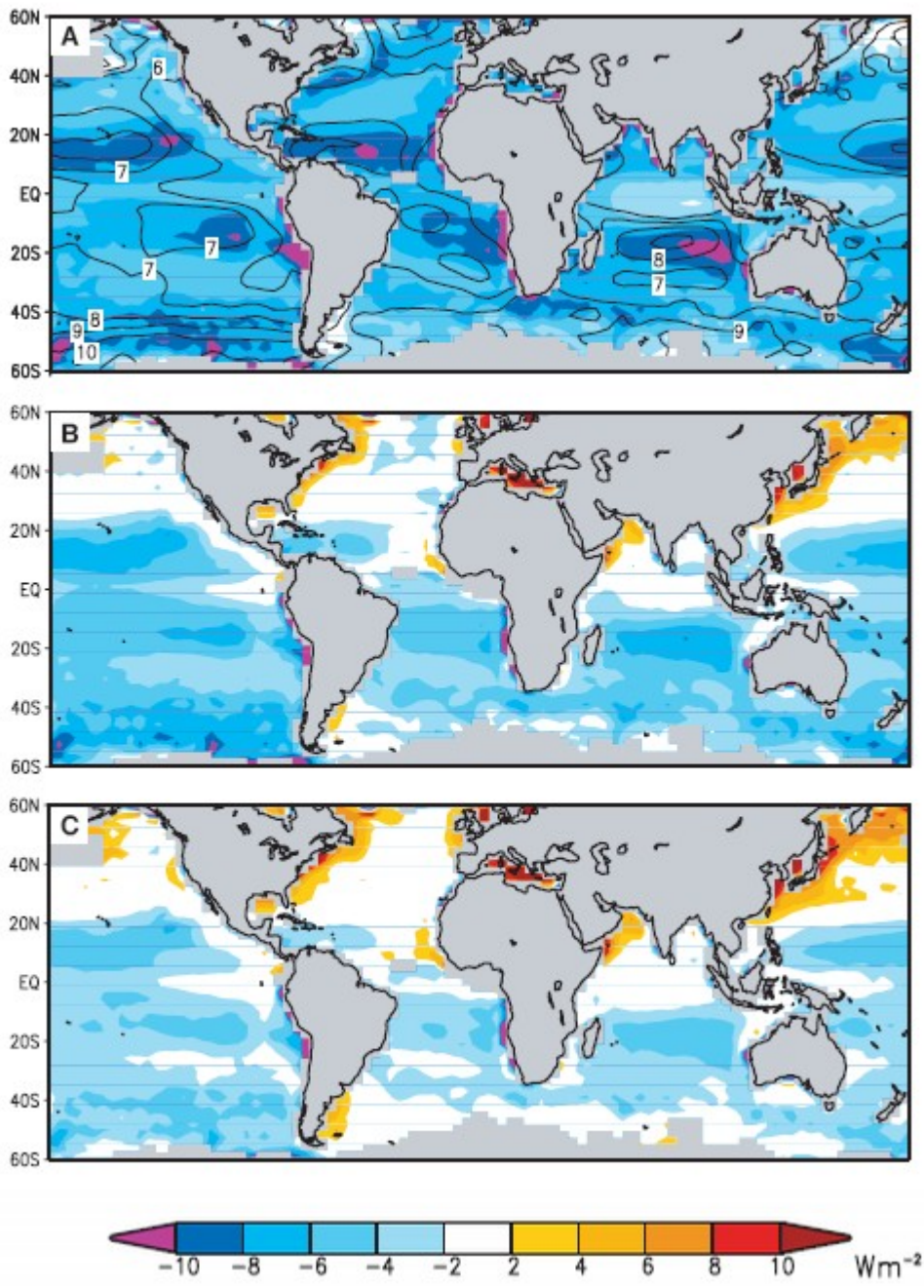
Pomiary aerozolowe na Barbadosie (Karaiby) wykazały, że pył (głównie pochodzący z Sahary) przyczynia się tam do całkowitego rozpraszania światła w atmosferze średnio cztery razy bardziej niż związki siarki. Także sól morską jest w warunkach cyrkulacji oceanicznej ważniejsza niż związki siarki.

# Sól morską

Porównanie wyników modelu klimatycznego i obserwacji satelitarnych albedo Ziemi:

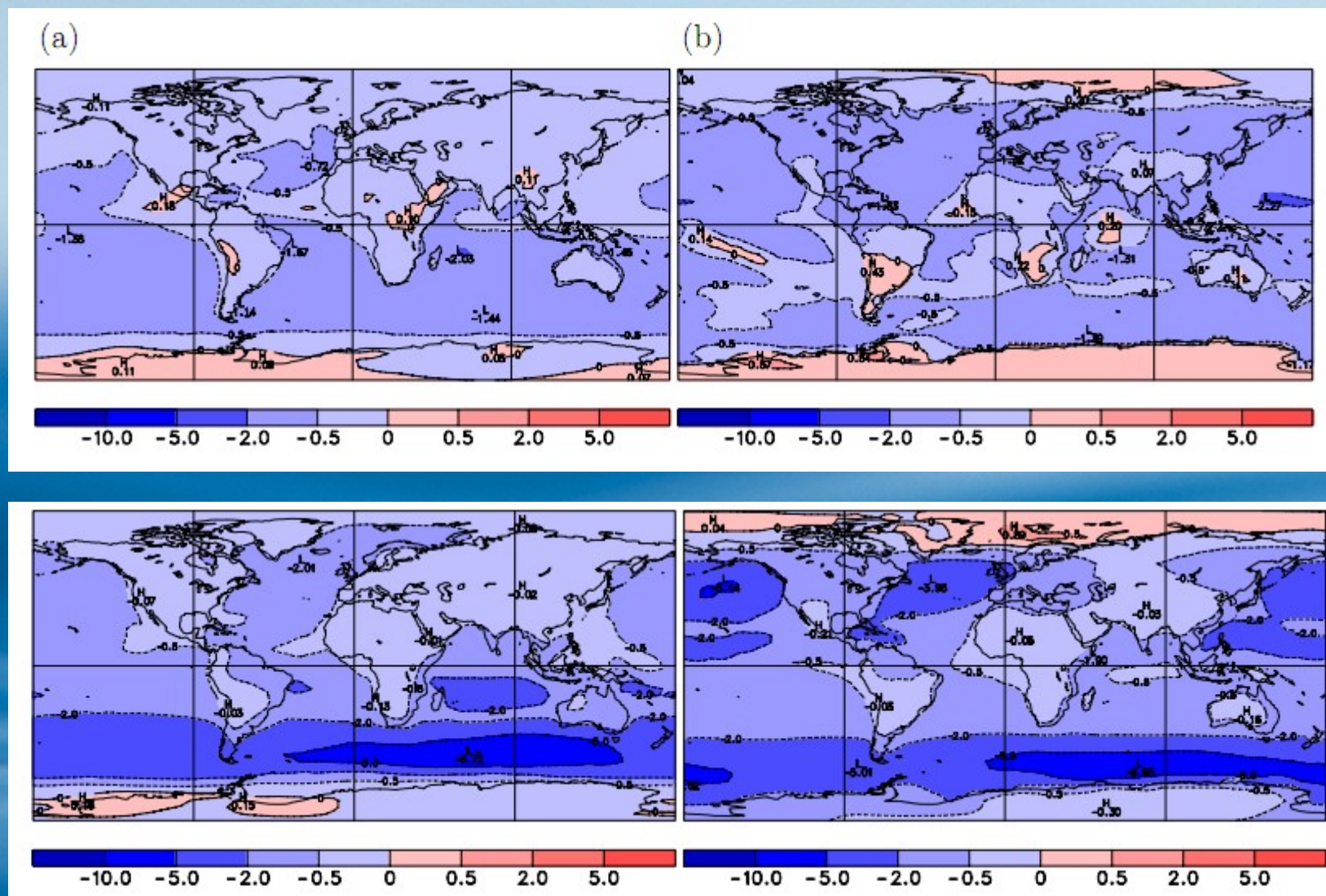
- a) model bez aerozolu
- b) model z aerozolami z wyjątkiem soli morskiej w
- c) j.w. plus sól morską

Nadwyżka rozpraszania w modelu w rejonach przybrzeżnych wynika prawdopodobnie z osobnego liczenia związków siarki i soli. W rzeczywistości łączą się one ze względu na silnie higroskopowe właściwości soli morskiej.





# Sól morską: bezpośrednie wymuszenie radiacyjne



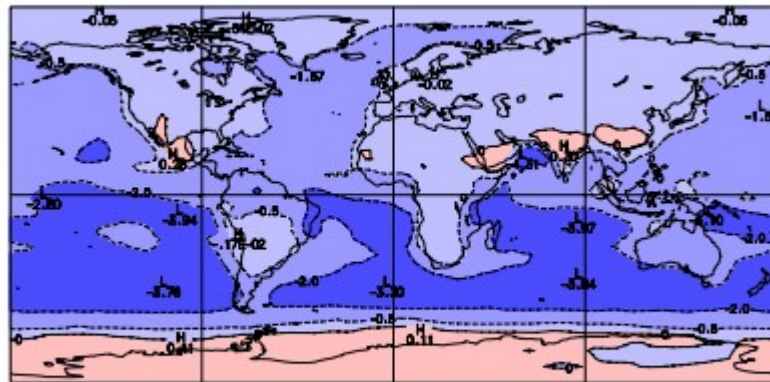
Wyliczone modelem wymuszenie bezpośrednie soli morskiej latem JJA (lewa) i zimą DJF (prawa) w  $\text{W/m}^2$  dla czystego nieba (na górze) czyli bez efektu chmur na pole światła i aerozolu na chmury, oraz „all-sky” czyli z chmurami (na dole)

*Ma, von Salzem & Li 2008 (Atmos. Chem. Phys.)*

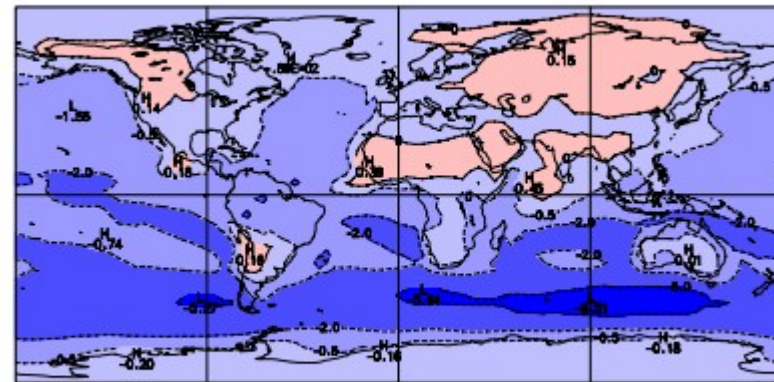


# Sól morską: związki z chmurami

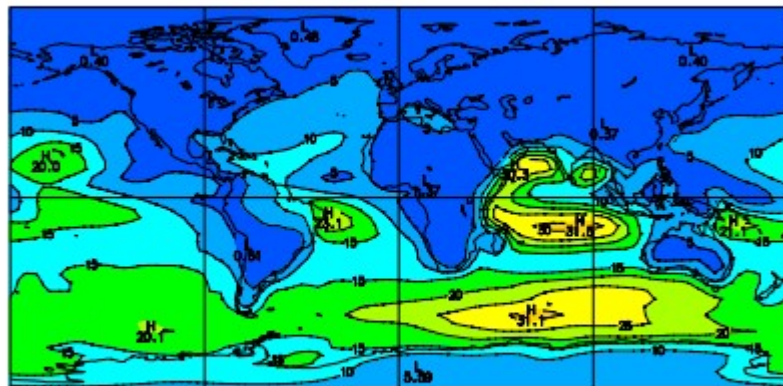
(a)



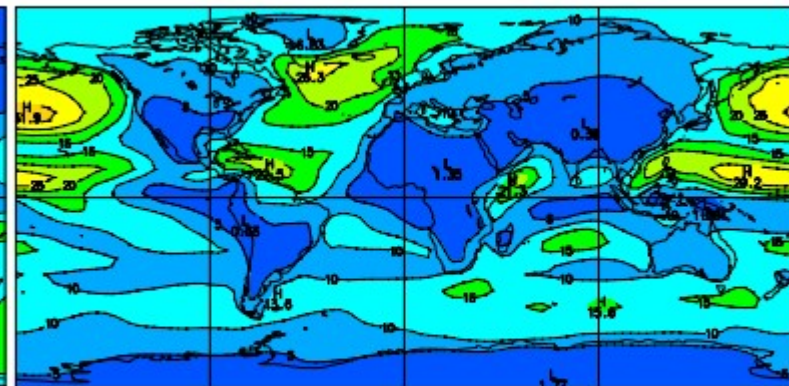
(b)



(a)



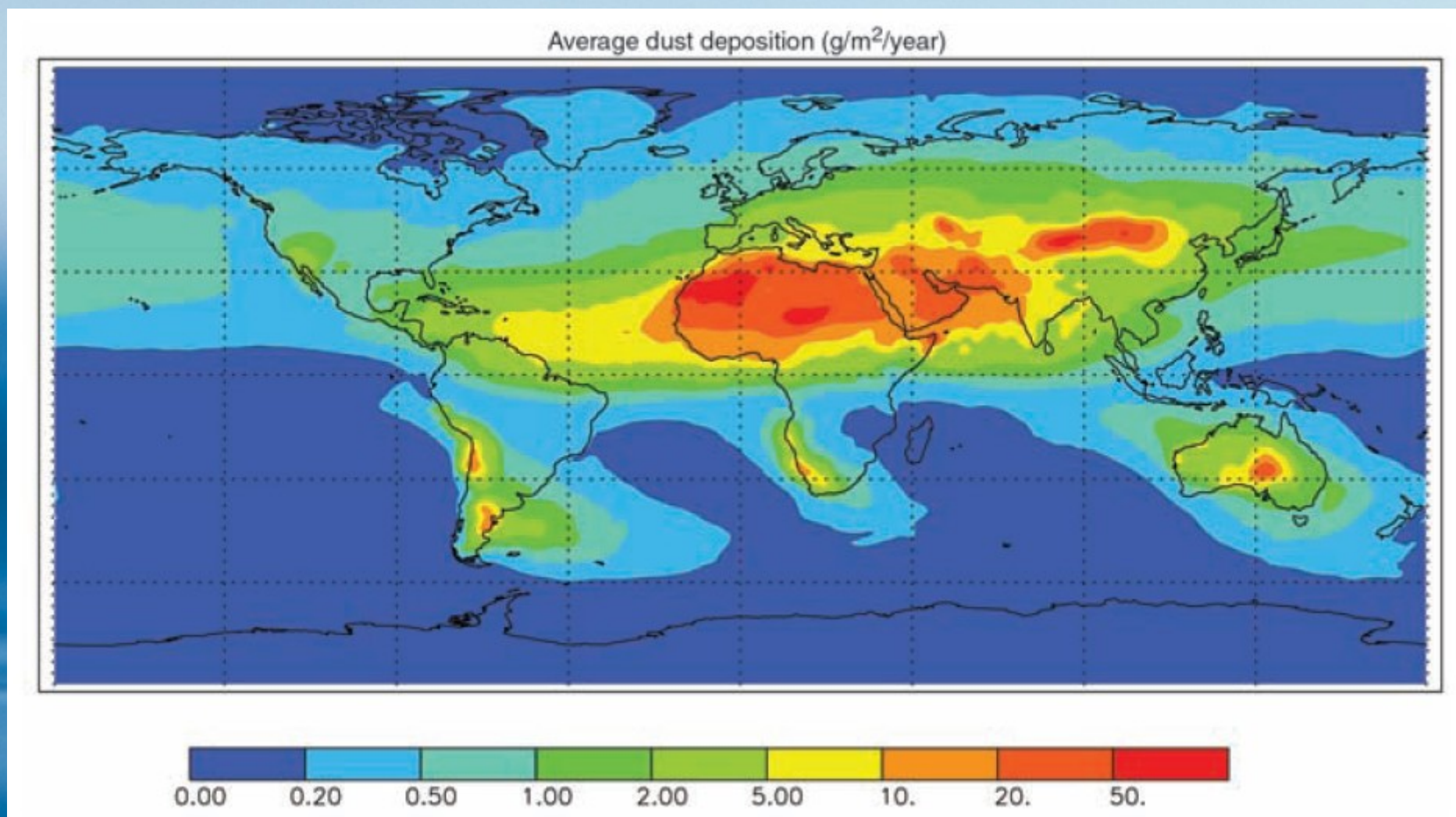
(b)



Wyliczone modelem pierwsze pośrednie wymuszenie radiacyjne latem (a) i zimą (b) w  $\text{W/m}^2$  (na górze) oraz ilość soli morskiej w atmosferze (w  $\text{g/m}^2$ )



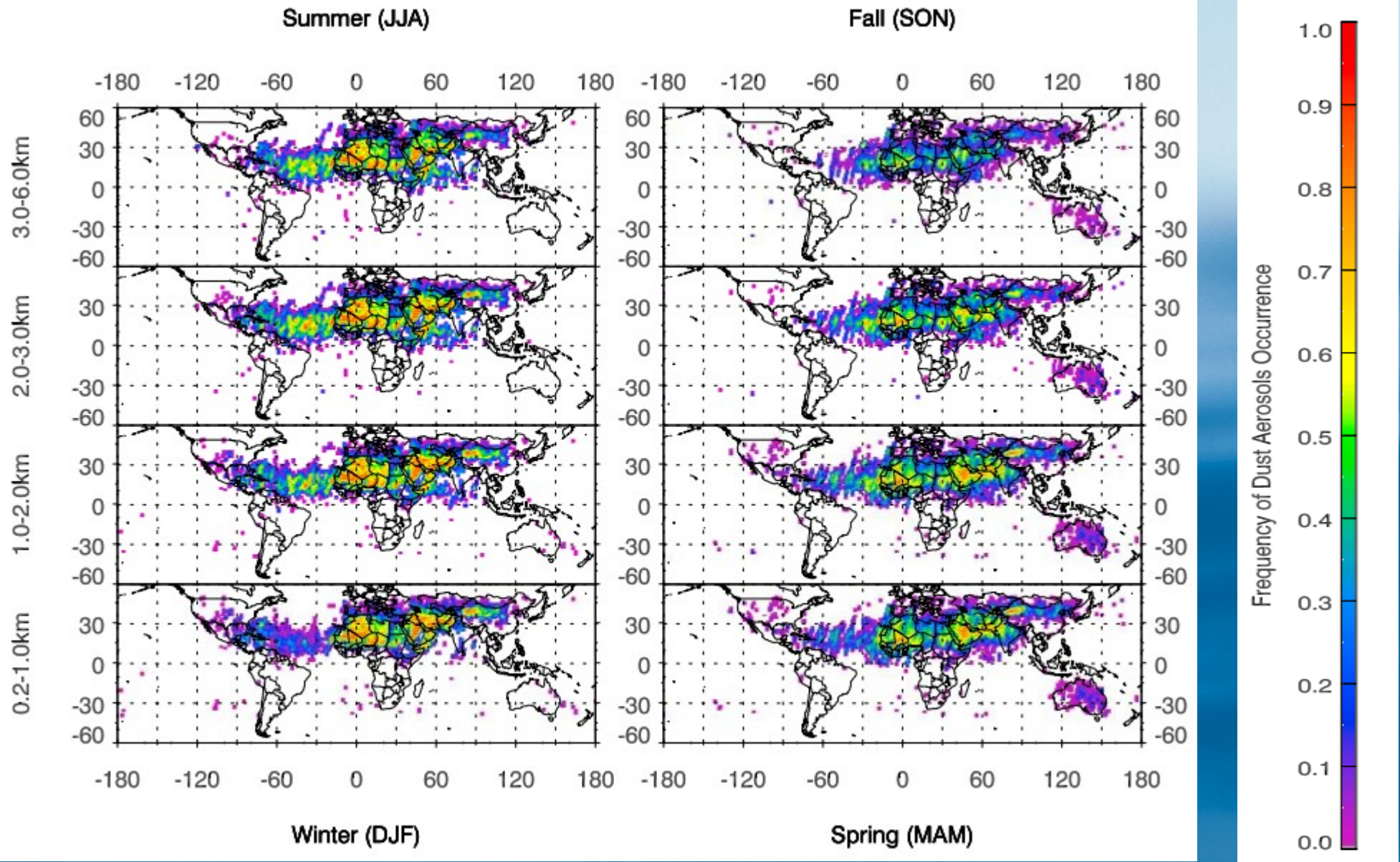
# Opad pyłu pochodzenia kontynentalnego



Opad pyłu kontynentalnego (średnia z trzech modeli) ocenia się na 450 Tg/rok, z czego 43% na Północnym Atlantyku, 25% Oceanie Indyjskim i 15% na Północnym Pacyfiku. Na południowej półkuli łącznie poniżej 20%.



# Pył latem i jesienią

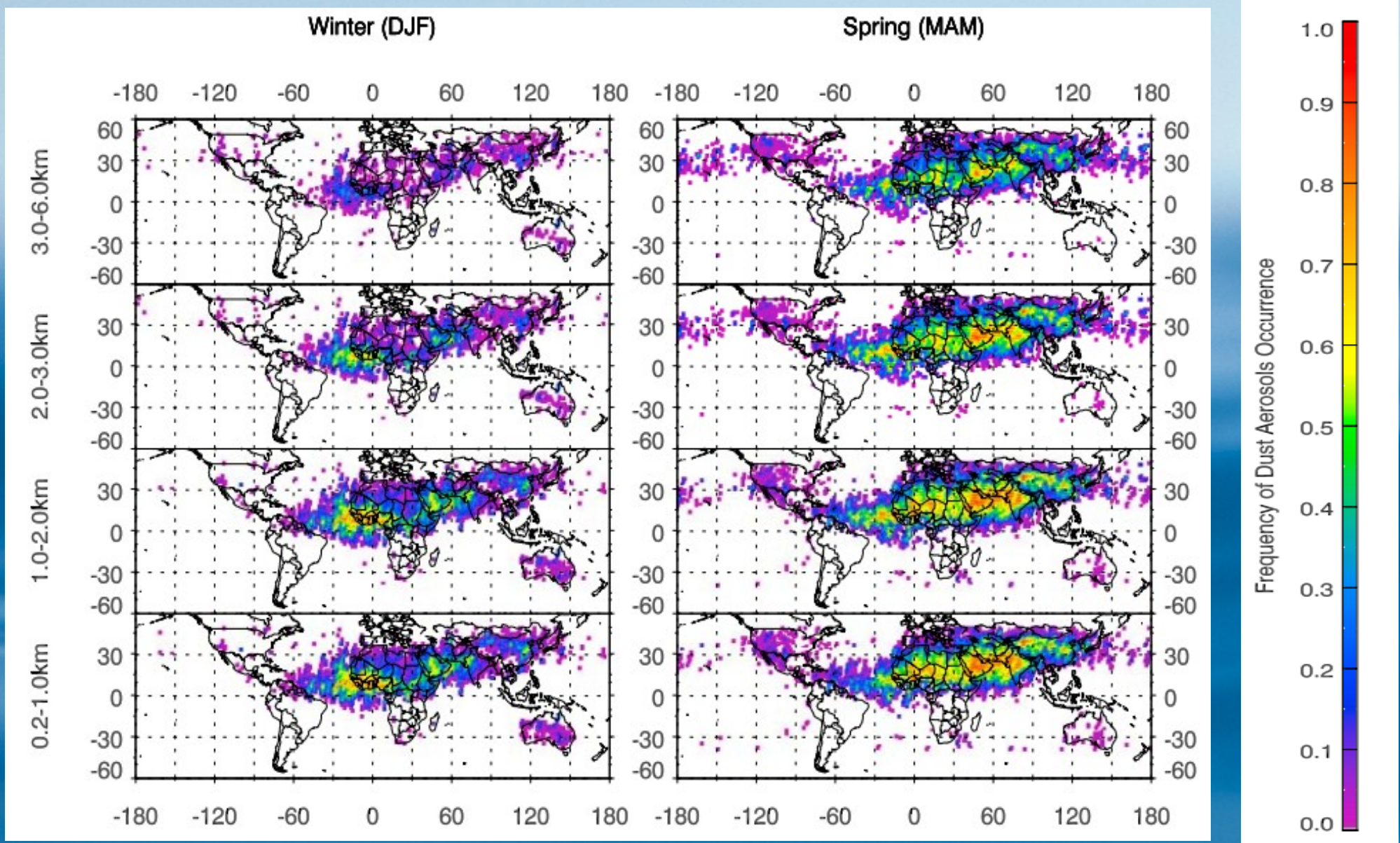


Częstotliwość występowania pyłu latem i jesienią w pierwszym roku operacji lidarowego satelitarne CALIPSO.

*Liu et al. 2008 (JGR)*



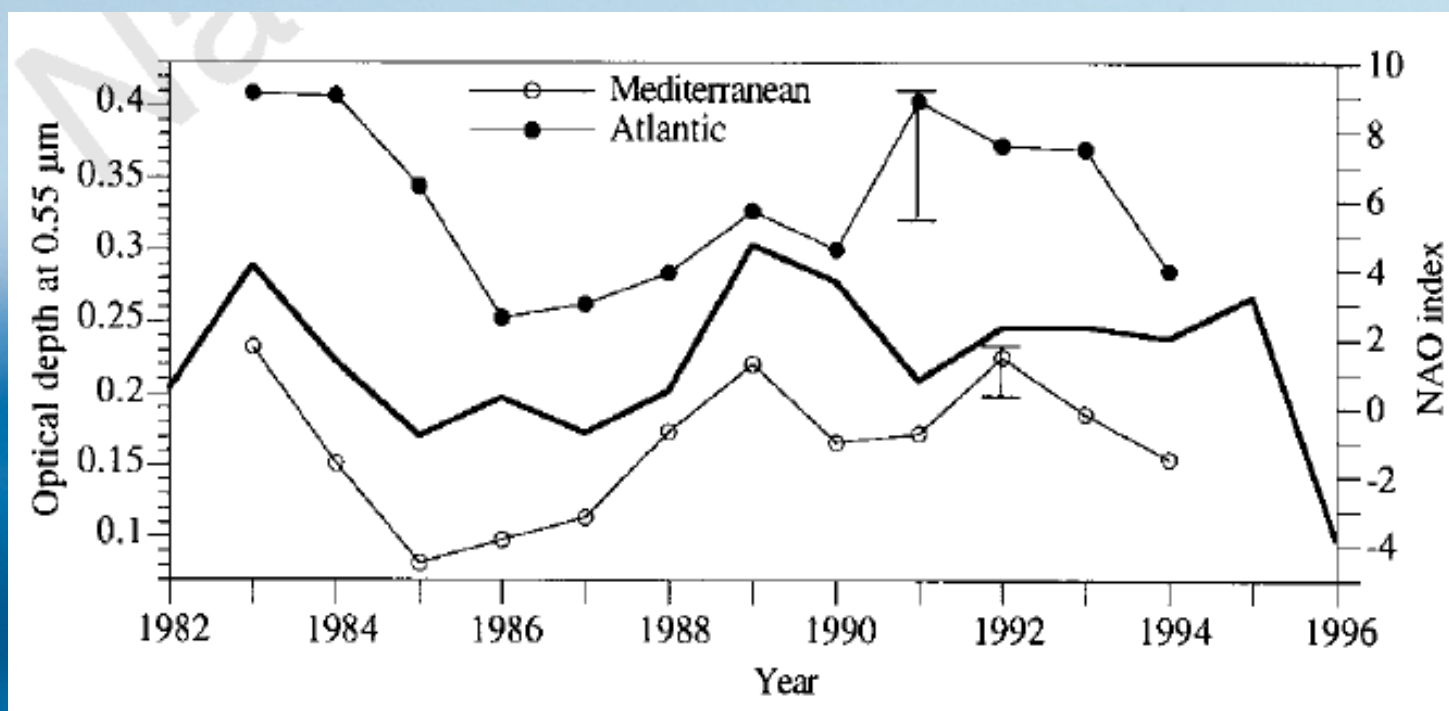
# Pył zimą i wiosną



Częstotliwość występowania pyłu zimą i wiosną w pierwszym roku operacji lidaru satelitarnego CALIPSO.

*Liu et al. 2008 (JGR)*

# Opad pyłu z Sahary skorelowany z NAO

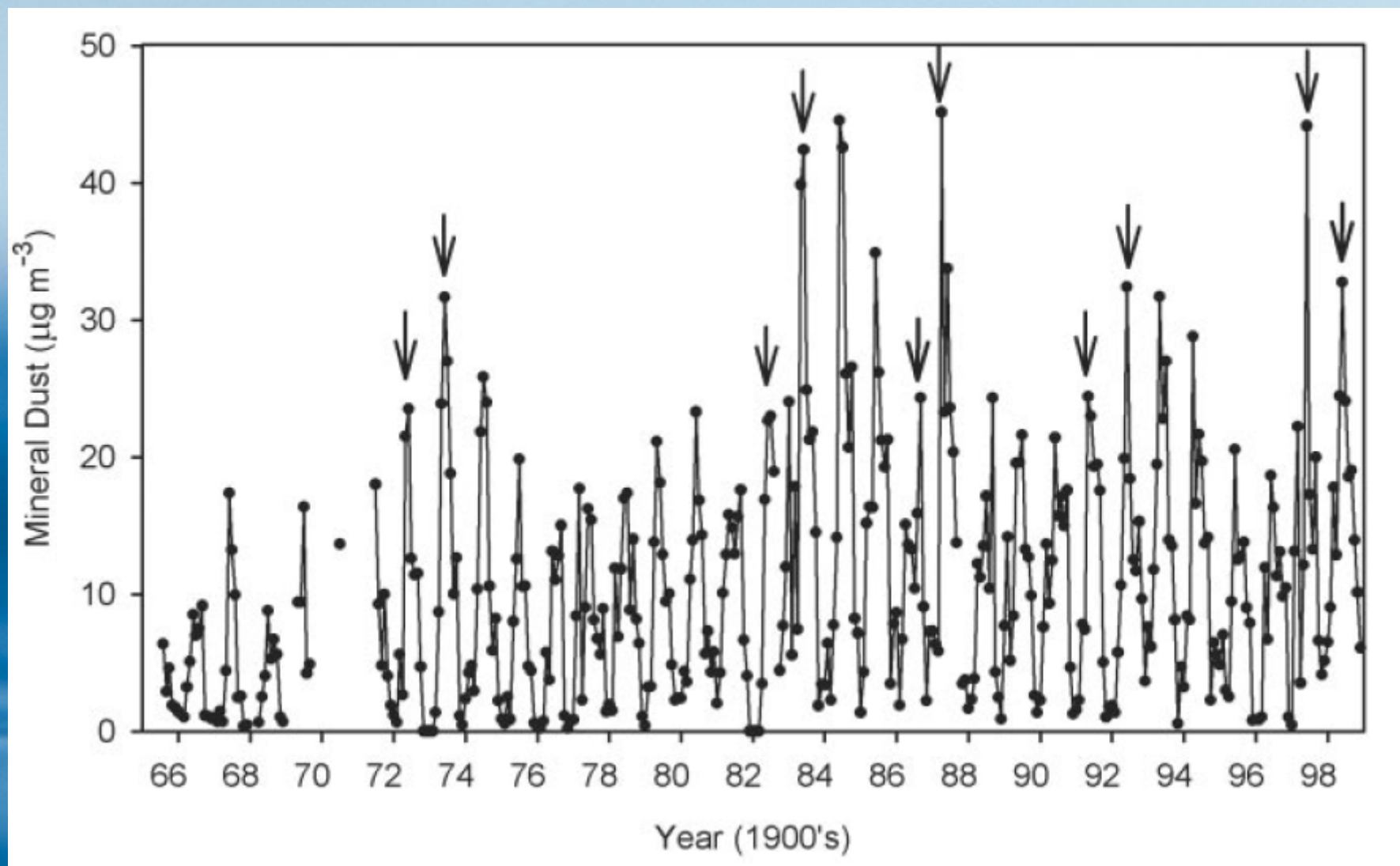


Opad pyłu kontynentalnego na Północnym Atlantyku i Morzu Śródziemnym skorelowany jest dodatnio z North Atlantic Oscillation (NAO), odpowiednio z  $r = 0.49$  oraz  $r = 0.66$ .

Co ciekawe istnieją poglądy o związku przyczynowym tych wielkości... w obie strony. Nadal jednak wydaje się, że to cyrkulacja bardziej wpływa na produkcję i transport pyłu niż odwrotnie (tzn. Aerosol wpływa na SST i przez to na cyrkulację atmosferyczną – patrz *Luo, Yu & Wang 2009*)



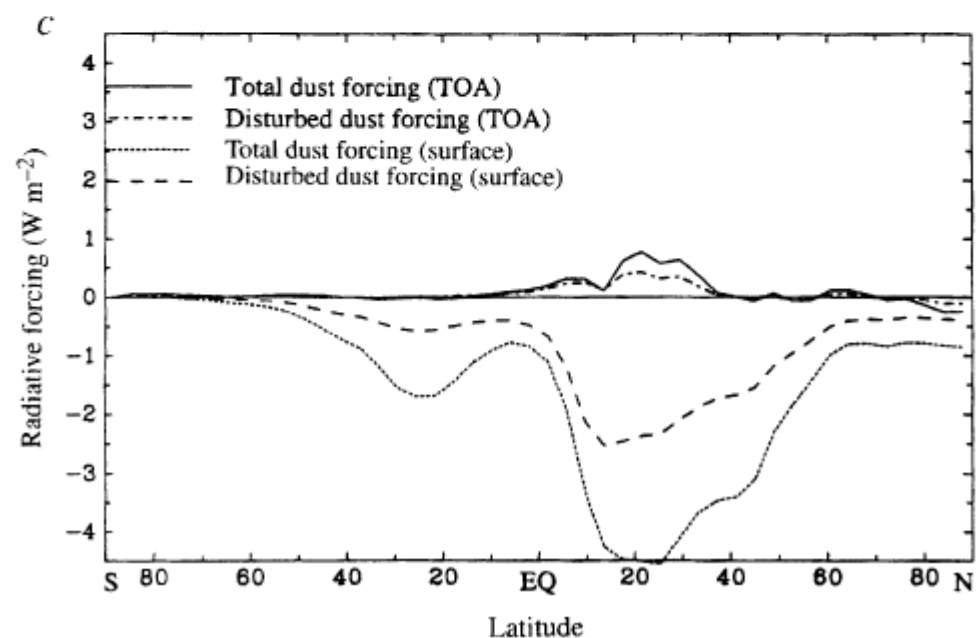
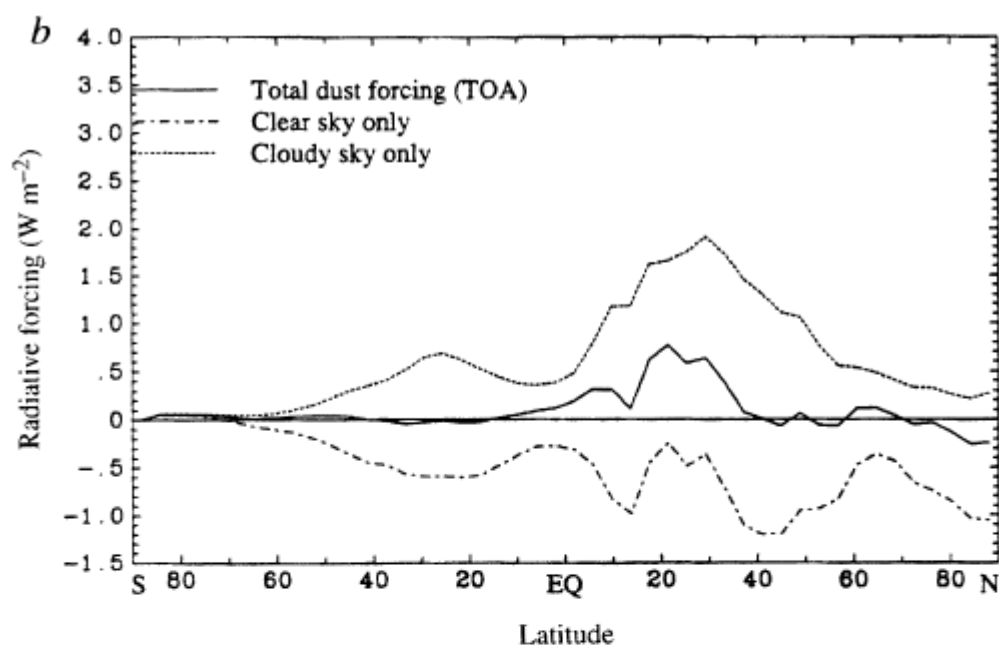
# Opad pyłu z Sahary skorelowany z El Niño



Opad pyłu kontynentalnego z Sahary na Barbadosie i El Niño (strzałki). Lato po El Niño przynosi większe niż przeciętna ilości pyłu. Wymuszanie aerozolowe (chłodzenie) może to częściowo tłumaczyć dlaczego sezon po El Niño przynosi małą ilość huraganów na Północnym Atlantyku.

*Prospero & Lamb 2003 (Science)*

# Wpływ pyłu: oziębianie powierzchni ziemi i ogrzewanie atmosfery

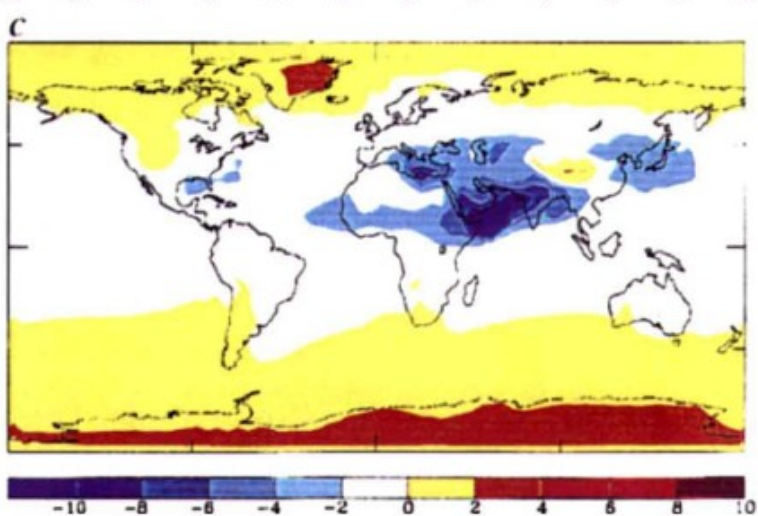
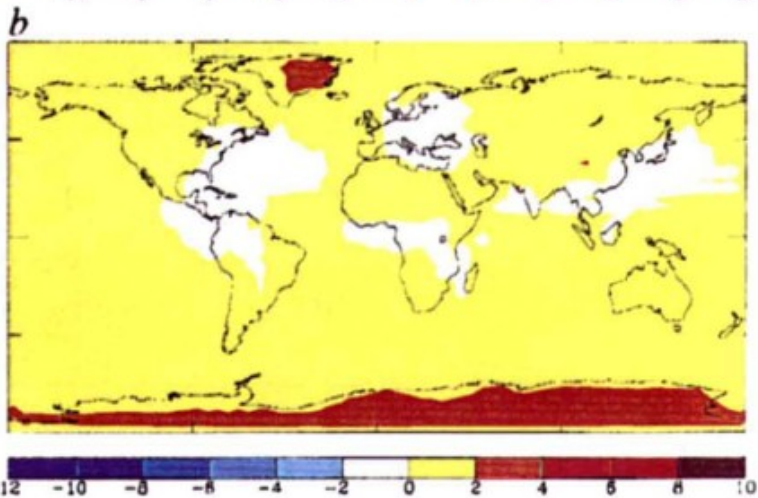
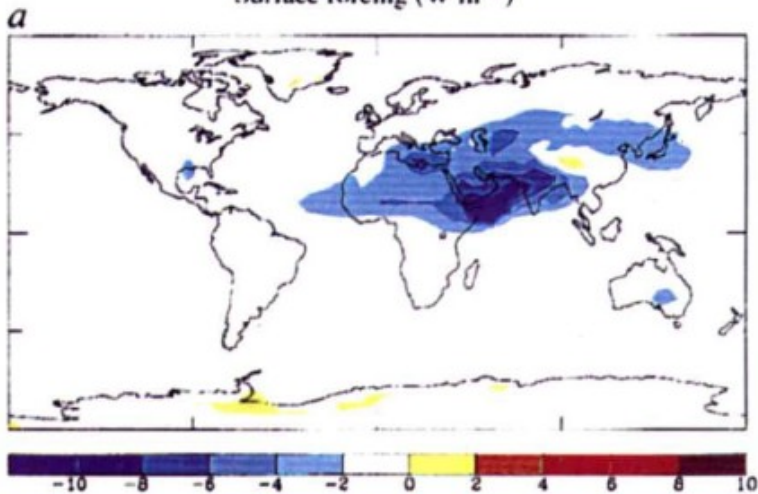


Pył z pustyń i pochodzenia antropogenicznego oziębia powierzchnię ziemi przy czystym niebie (rozpraszanie) ale jednocześnie ogrzewa atmosferę (absorpcja) a także powierzchnię ziemi zakrytą chmurami góra).

Dolny panel pokazuje różnicę wymuszania na szczycie atmosfery (TOA) i na poziomie ziemi – miarę absorpcji ogrzewającej atmosferę.  
[*disturbed = from disturbed sources  $\approx$  anthropogenic*]



Surface forcing ( $\text{W m}^{-2}$ )

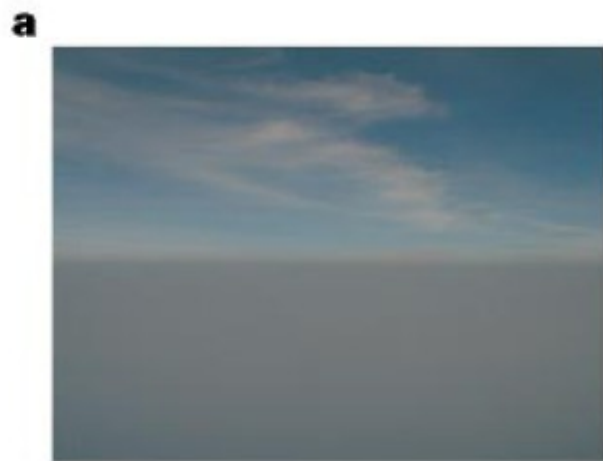


## Wpływ pyłu: oziębianie powierzchni powierzchni ziemi i ogrzewanie atmosfery

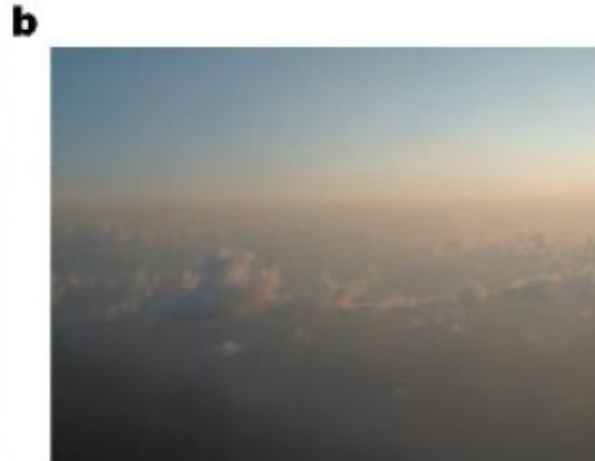
Na rysunku (stan wiedzy na 1996 r) wyliczone wymuszanie na powierzchni ziemi związane z pyłem (góra), gazami cieplarnianymi i aerozolami zawierającymi siarkę (środek) oraz sumaryczne (dół).

Czy to już cały wpływ aerozolu? Niestety nie.

# Aerozol zawierający sadzę nad Oceanem Indyjskim



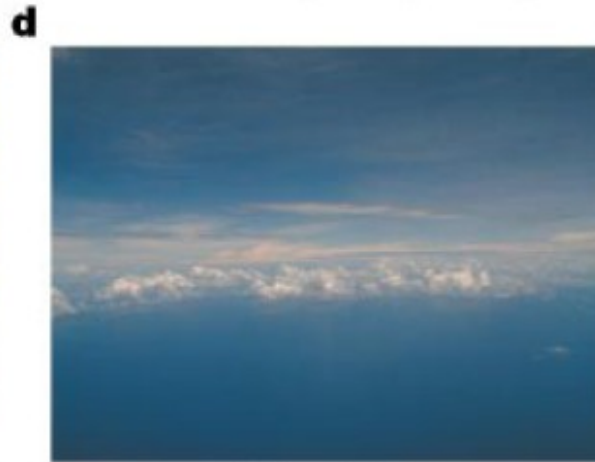
21 March, 1999: Arabian Sea;  
thick haze (9.2°N, 73.5°E)



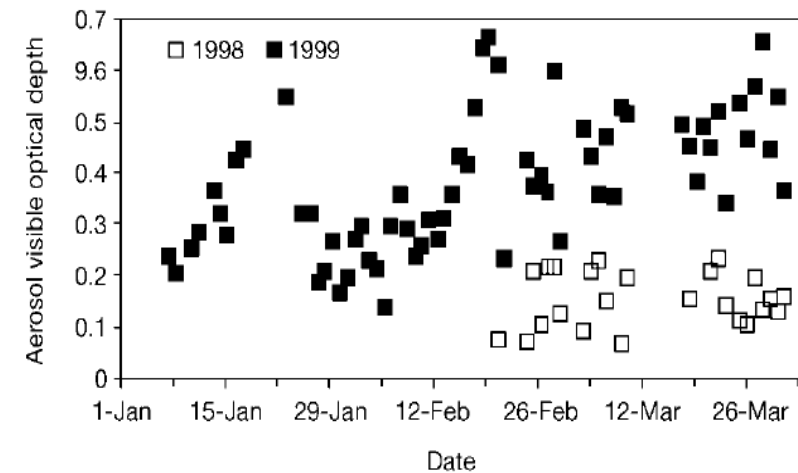
25 March, 1999: clouds under  
thick haze (3.0°N, 74.5°E)



24 February, 1999:  
just north of ITCZ;  
haze extends up to top  
of Cu (0.5°N, 73.3°E)



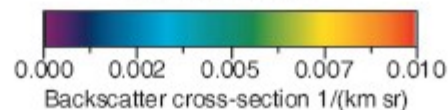
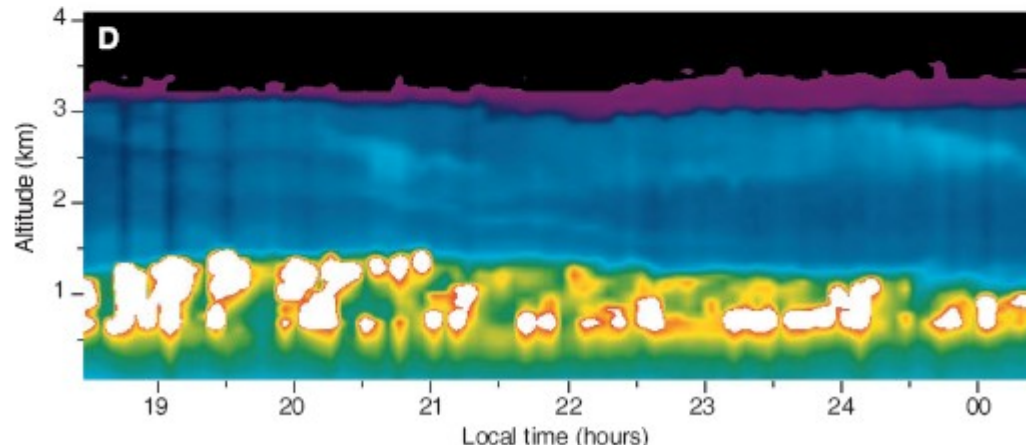
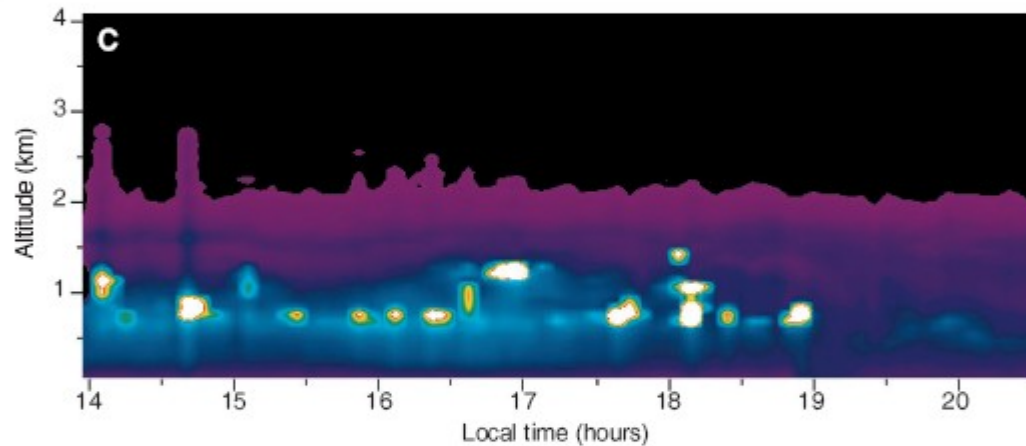
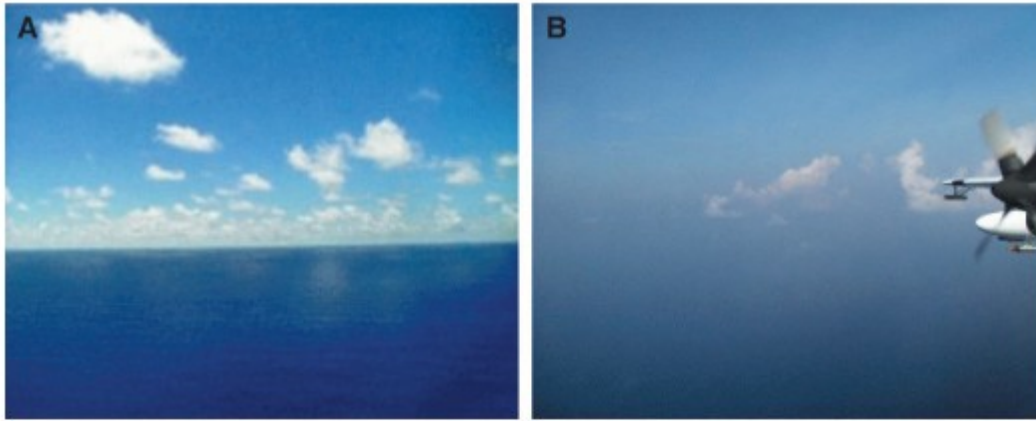
24 March, 1999:  
south of ITCZ;  
almost pristine clouds  
(7.5°S, 73.5°E)



Badania w latach 1998-1999 (projekt INDOEX) wykazały, że olbrzymie obszary Oceanu Indyjskiego na północ of ITCZ pokryte są grubą warstwą aerozolu pochodzącego z Półwyspu Indyjskiego (grubość optyczna na górze). Sadza zawarta w nim oziębiała ocean o 12-30 W/m<sup>2</sup>



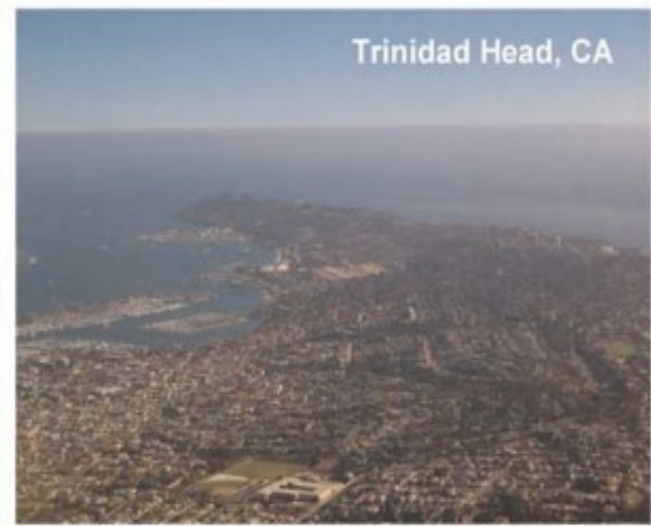
# Ogrzewanie przez aerozol może powstrzymać rozwój chmur



W czasie projektu INDOEX odkryto, że w rejonach tropikalnych z dużą koncentracją aerozolu pochodzącego ze spalania paliw kopalnych i drewna aerozol ogrzewa atmosferę na tyle, że utrudnia to powstawanie chmur kłębiastych. Powoduje to dodatkowe grzanie powierzchni ziemi przez promieniowanie słoneczne (dodatnie wymuszanie zwane “pół-bezpośrednim” (*semi-direct forcing*), które może wyrównywać lub nawet przewyższać „wymuszanie pośrednie” (zwiększenie grubości optycznej chmur). Efekt ten ocenia się nawet na  $+0.55 \text{ W/m}^2$  (Jacobson 2001) czyli więcej niż efekt cieplarniany metanu ( $+0.47 \text{ W/m}^2$ )

*Ackerman et al. 2000 (Science)*

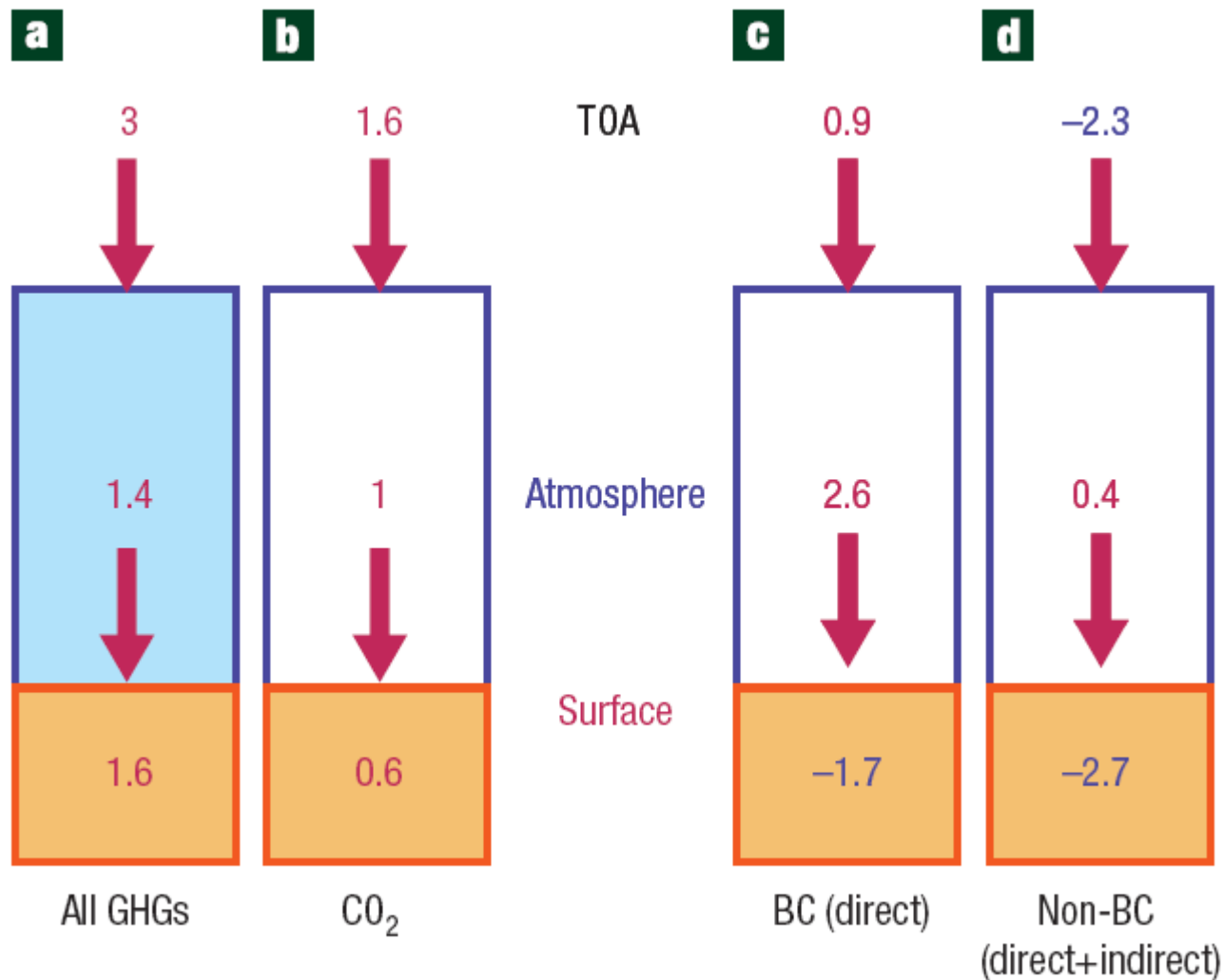
## Więcej przykładów “brązowych chmur”



Chmury zawierający absorbujący aerozol (głównie sadzę) występują oczywiście nie tylko nad Oceanem Indyjskim.



## Black carbon enters the scene.



Radiative forcing ( $\text{W m}^{-2}$ ) of:  
a) all greenhouse gases, b)  $\text{CO}_2$  only,  
c) black carbon (soot), d) other aerosols.

This additional warming of the planet (see TOA values) with direct surface cooling and troposphere warming complicates the aerosol  $\rightarrow$  climate influence even more.

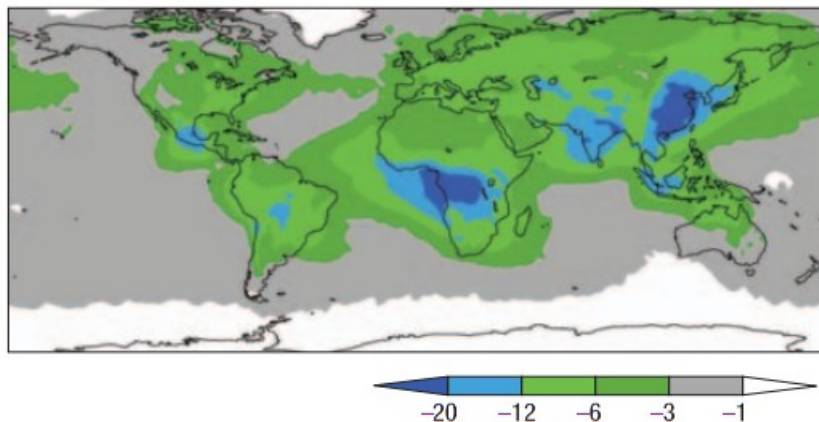
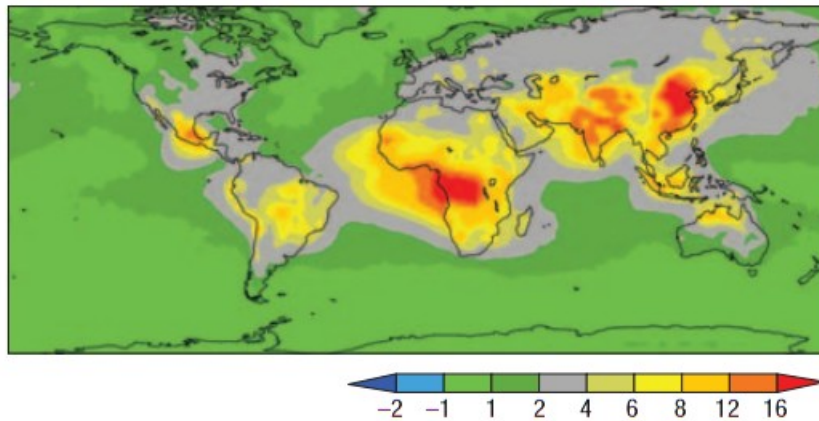
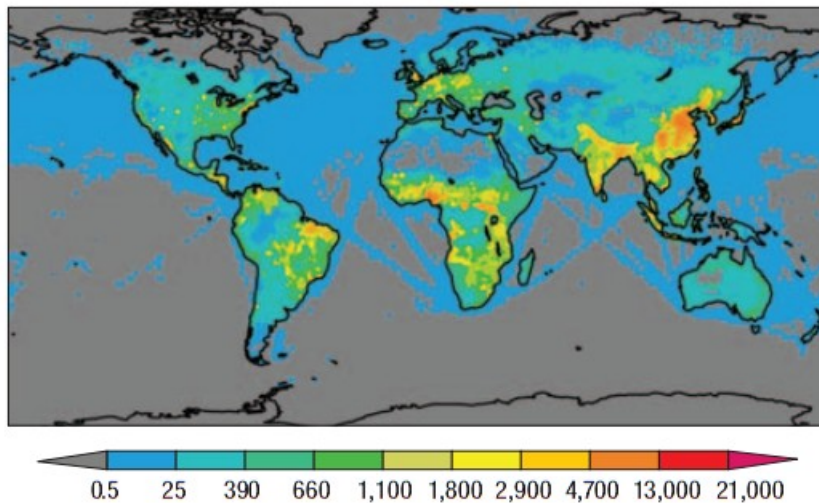
# Black carbon climatology

Global distribution of BC sources and radiative forcing.

**a**, BC emission in tons per year including emissions from fuel combustion (fossil fuels and biofuels) and open biomass burning (forest fires, savanna burning and outdoor cooking) for the year 1996. The uncertainty in the regional emission is about  $\pm 100\%$  or more.

**b**, Atmospheric solar heating due to BC or the 2001 to 2003 period. Uncertainty in the forcing is  $\pm 30\%$ .

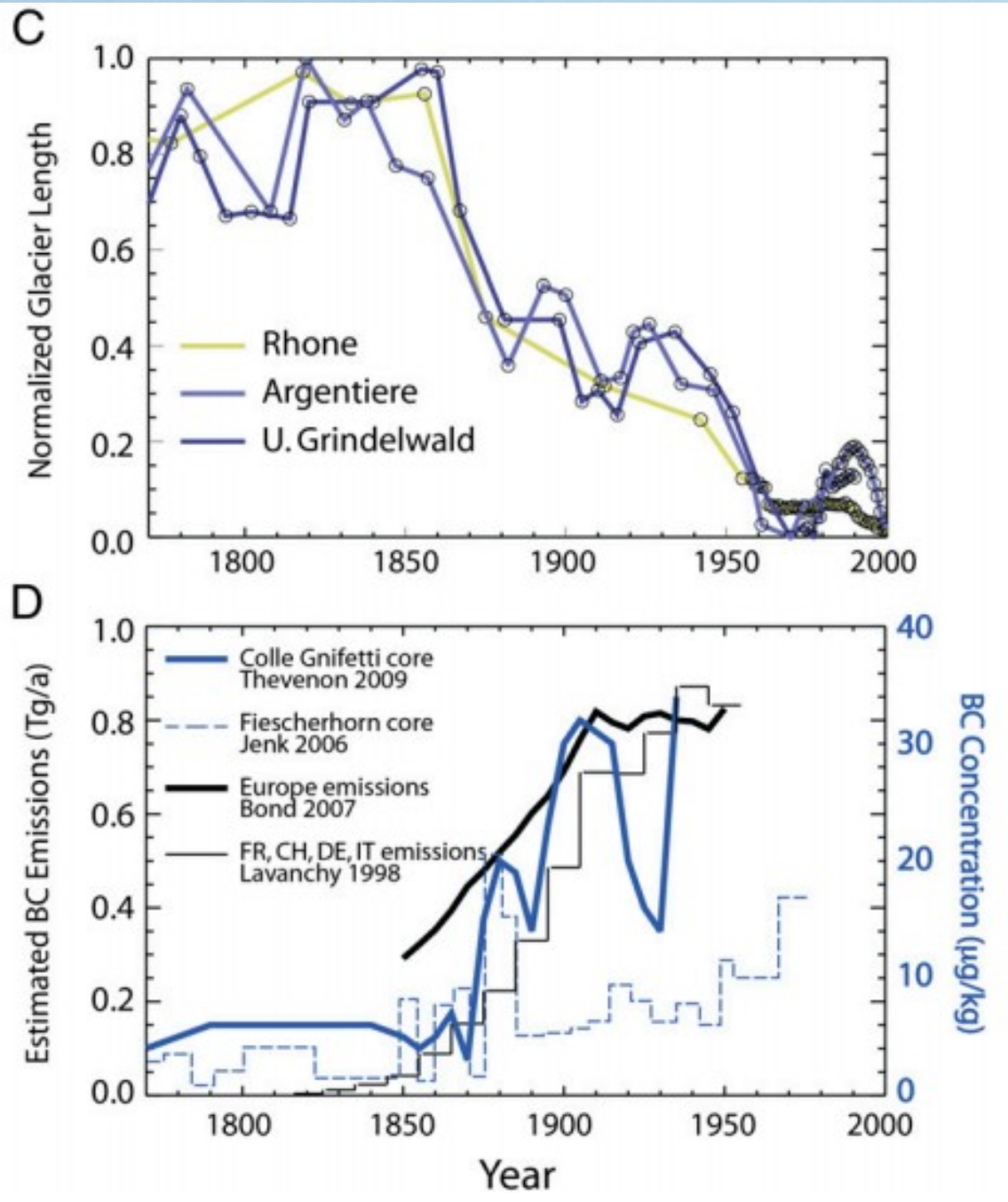
**c**, As in b, but for surface dimming due to atmospheric brown clouds (ABCs). This shows the reduction in absorbed solar radiation at the surface by all anthropogenic aerosols (BC and non-BC) in ABCs



*Ramanathan & Carmichael 2008  
(Nature Geoscience)*



# Emisje sadzy zakończyły Małą Epokę Lodową w Alpach?

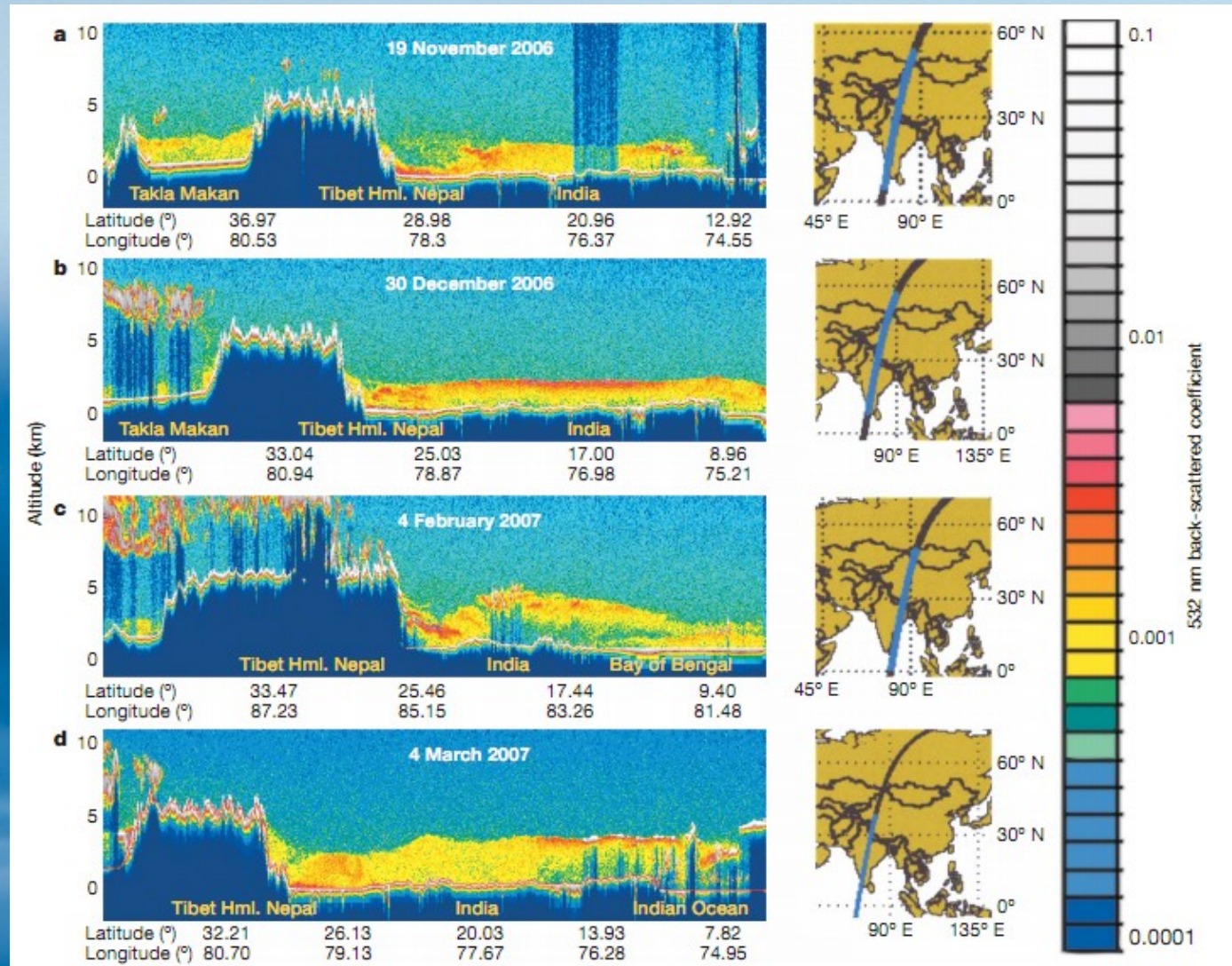


Lodowce alpejskie zaczęły cofać się zaraz po roku 1850 (panel C), znacznie wcześniej niż mogłoby to wynikać z wzrostu koncentracji gazów cieplarnianych w XX wieku.

Niedawno zauważono, że wzrost koncentracji sadzy w lodzie tych lodowców (panel D) nastąpił w tym samym czasie. Emisje sadzy spowodowane były rosnącym użyciem węgla w przemyśle. Wyniki badań modelowych (nie pokazane) wskazują, że objętość utraconego lodu może być wyjaśniona tym wymuszeniem radiacyjnym.



# Aerozol zawierający sadzę bezpośrednio grzeje Himalaje

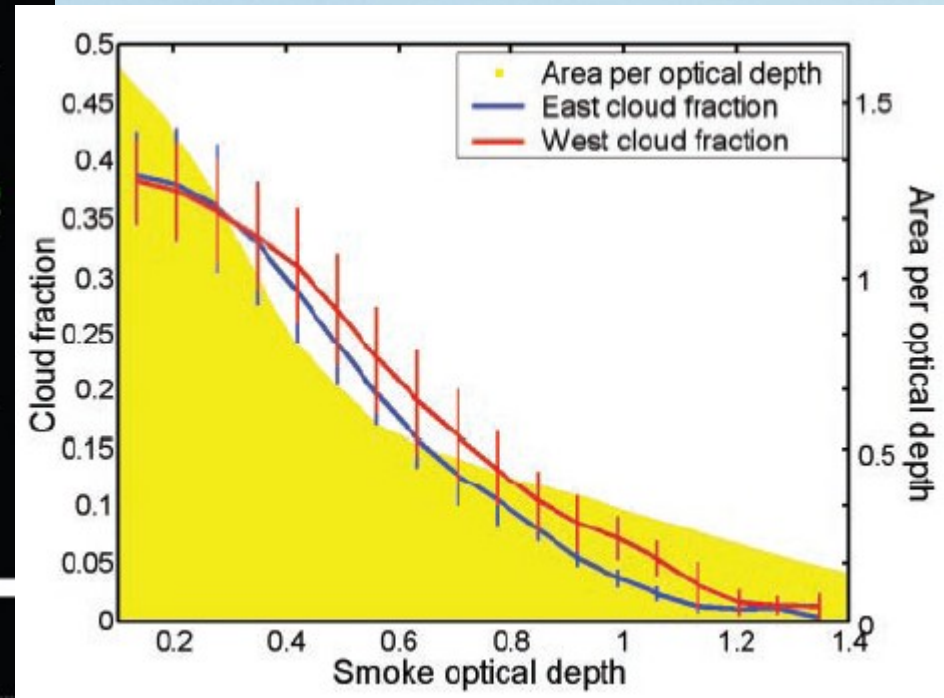
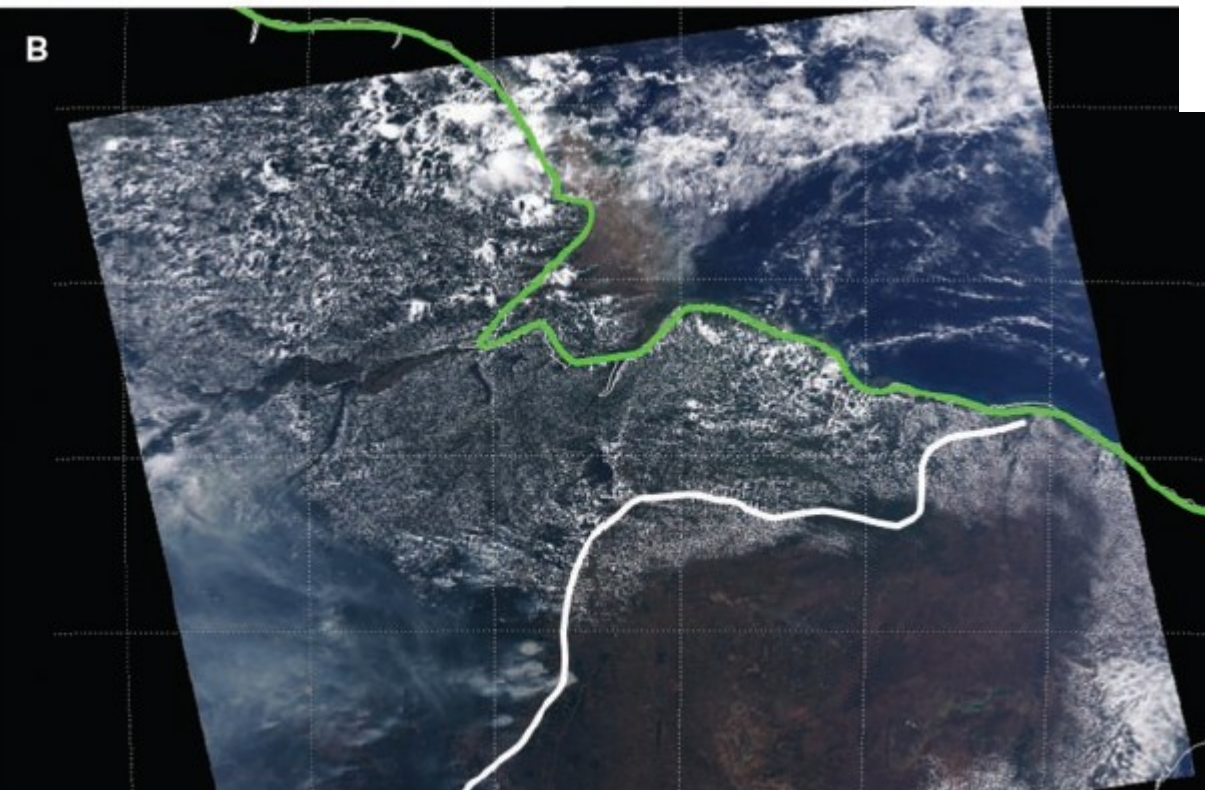
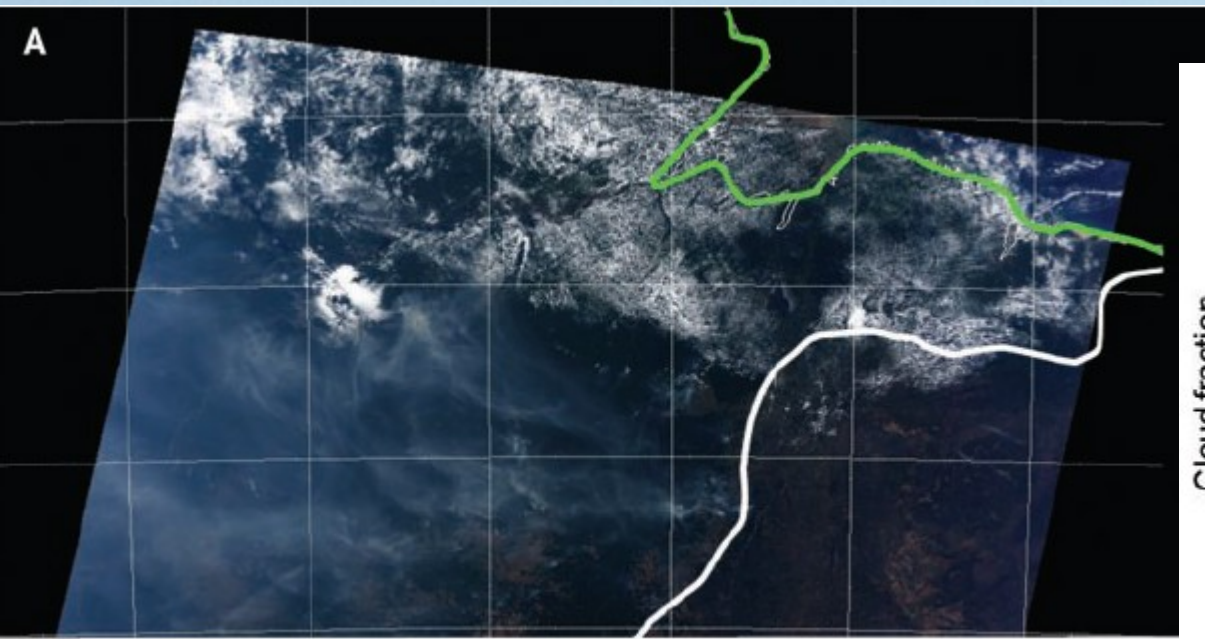


Pomiary z satelitarnego lidaru CALIPSO pokazują, że aerozol (brązowe, żółte i zielone) zalega na wysokościach na których w górach (niebieskie) są lodowce. Ponieważ aerozol ten zawiera sadzę powoduje to bezpośrednie ogrzewania powietrza mającego styczność z lodowcami górskimi. Chmury widoczne są jako obszary białe i szare a cirrusy żółte

*Ramanathan et al. 2007 (Nature)*



# Pożary lasów w Amazonii

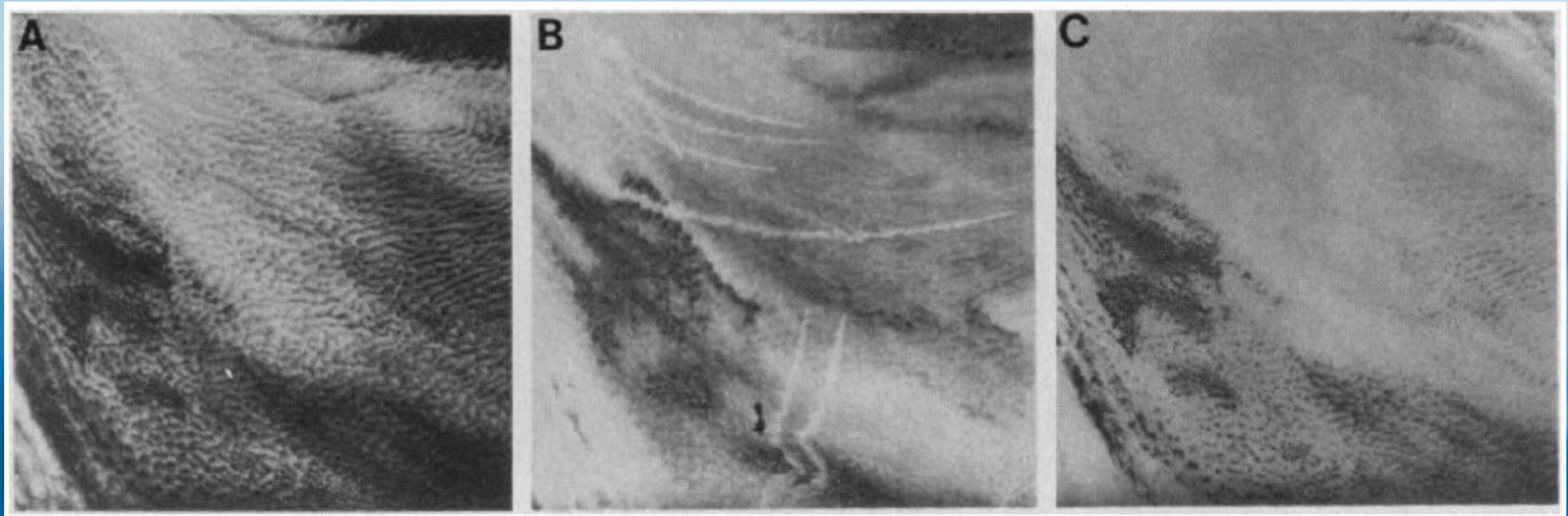


Pożary lasów w Amazonii (dolna lewa część panelu A) widziane rano i południe. Ze zdjęć i wykresu widać, że na zadymionym obszarze nie wytwarzają się cumulusy. Zmienia to “wymuszanie” dymowe z  $-28 \text{ W/m}^2$  na  $+8 \text{ W/m}^2$ .

*Koren et al. 2004 (Science)*



# Ślady statków w chmurach



W sprzyjających okolicznościach (mało centrów kondensacji) chmury mogą tworzyć się na cząstkach dymu z silników okrętowych. Zdjęci z czujników AVHRR satelity meteorologicznego NOAA-9. Na zdjęciach obszar 500 km razy 500 km w pasmach 0.63  $\mu\text{m}$ , 3.7  $\mu\text{m}$  oraz 11  $\mu\text{m}$ . Ze względu na (małą) wielkość cząstek chmur widoczne są one jako zwiększona reflektancja w paśmie 3.7  $\mu\text{m}$ .

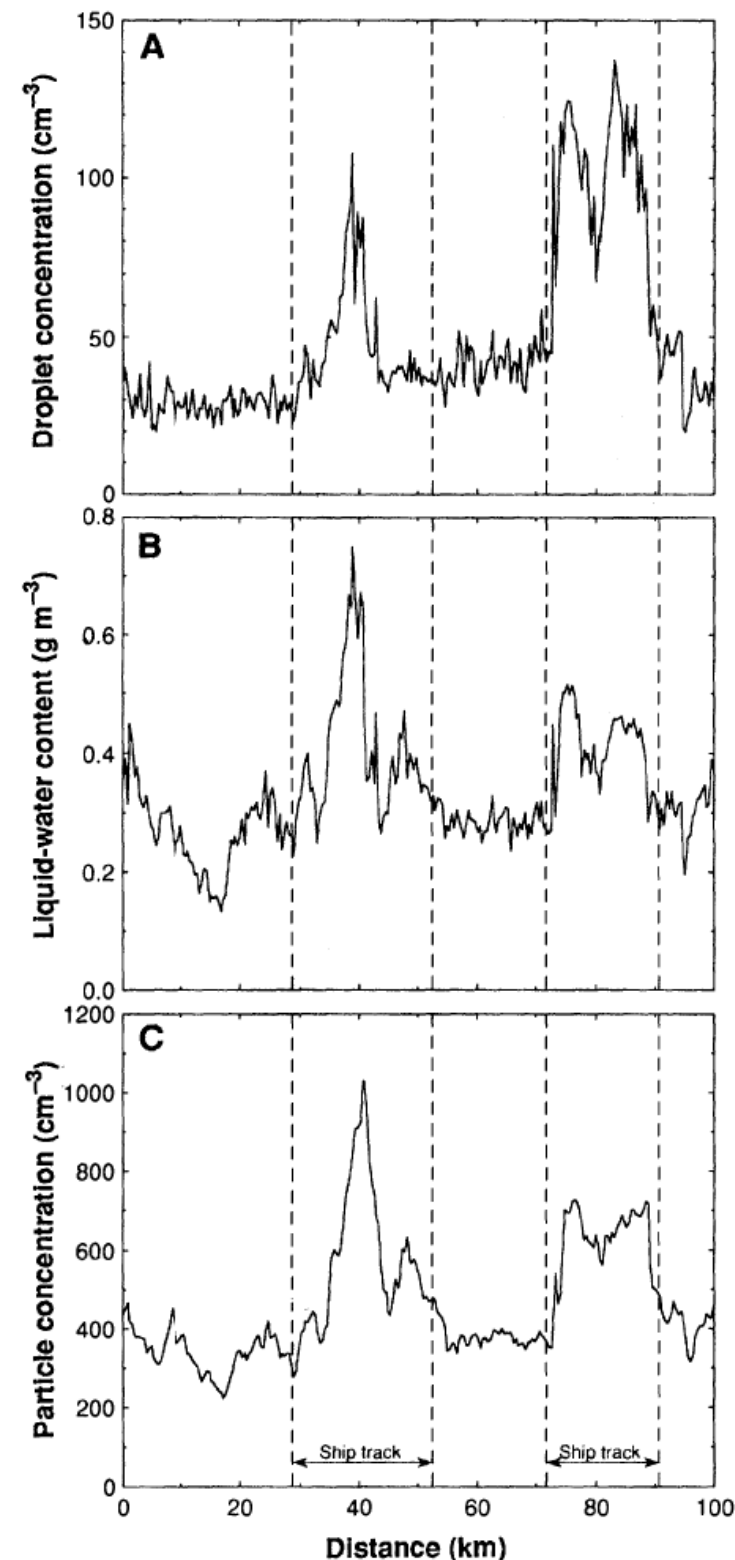


## 2<sup>nd</sup> aerosol indirect effect (forcing) wzrost czasu istnienia chmur

Przeloty samolotem badawczym przez pasma chmur pochodzenia okrętowego wykazały zwiększoną ilość kropel, zawartość wody i ilość cząstek aerozolu (w całym profilu pionowym).

Ponieważ zmniejszenie wielkości kropel przez zwiększenie ilości jąder kondensacji powoduje mniejsze opady z takich chmur żyją one dłużej wzmagając efekt chłodzenia (ujemne wymuszanie radiacyjne).

Efekt ten nazywamy ***drugim pośrednim efektem aerozolowym***.



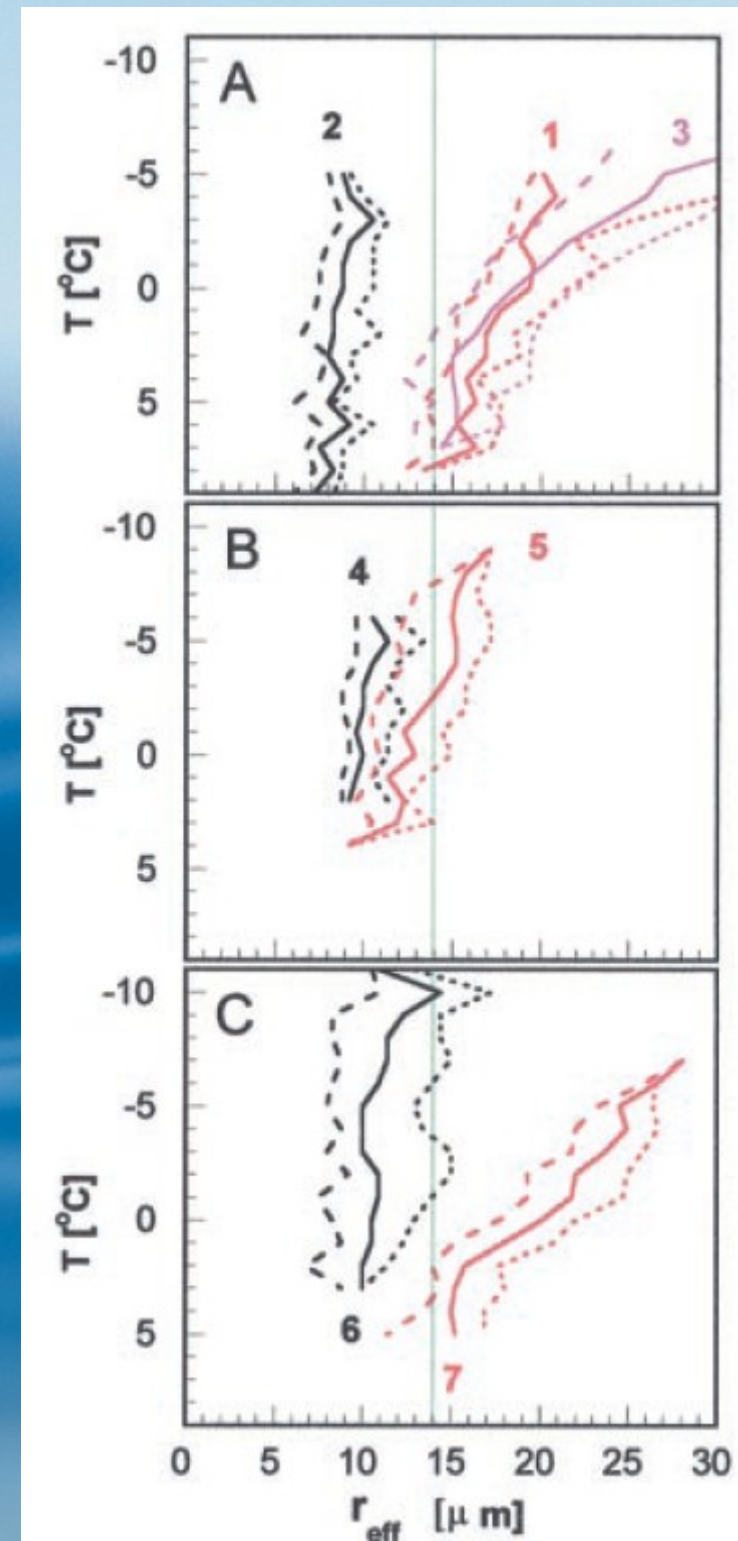
## 2-gi pośredni efekt nad lądem



Pasma chmur z drobnymi kroplami (białe) za zakładami przemysłowymi Południowej Australii (po lewej) oraz profile efektywnego promienia kropel dla **czystych** i **zadymionych** obszarów (po prawej - temperatura jest tu miarą wysokości). Deszcz powstaje z kropli o promieniu  $>14 \mu\text{m}$  (pionowa linia)

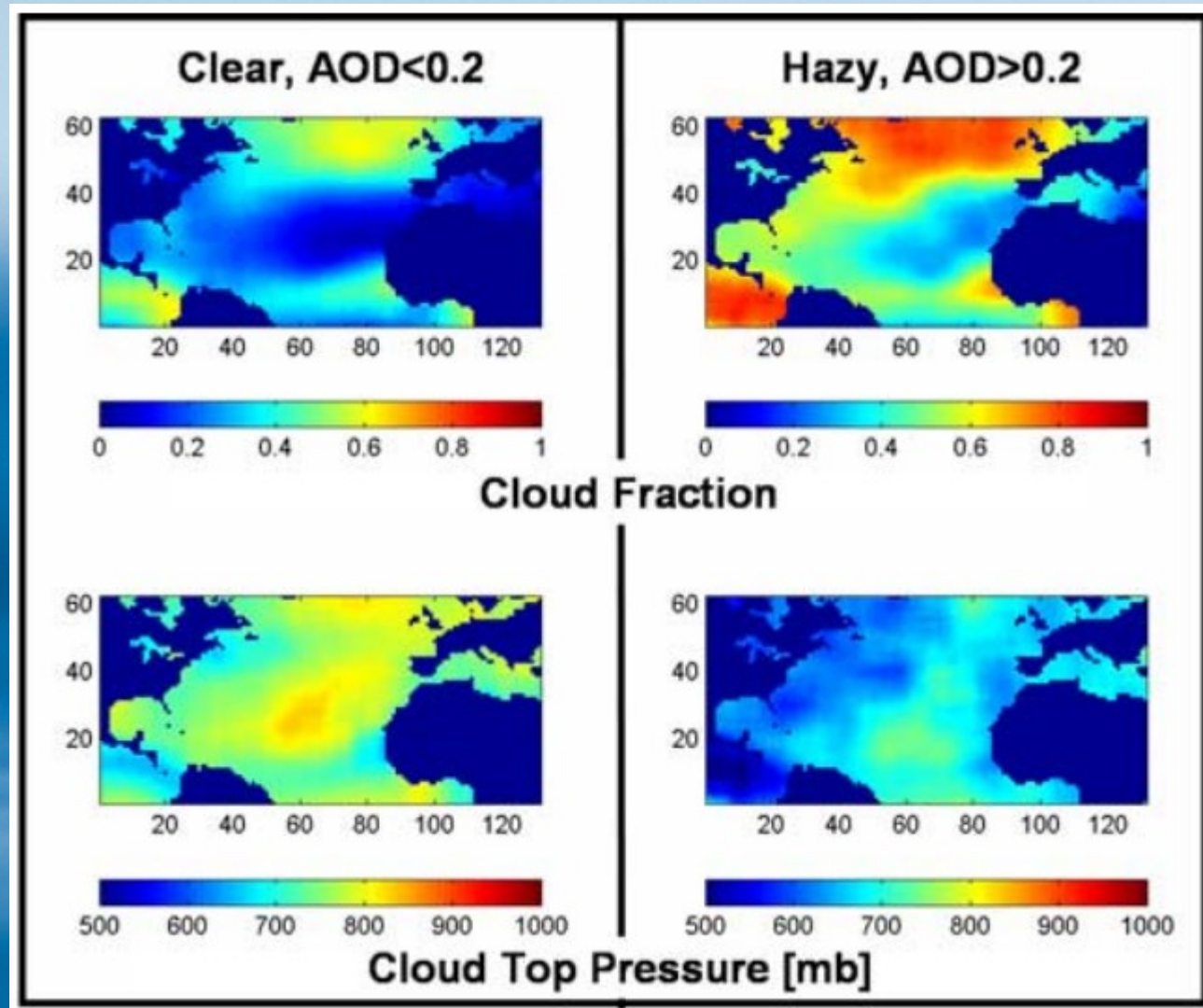
Aerozol może hamować powstawanie deszczu. Kontrast widoczny jest w Australii gdzie tło aerozolu jest małe. Czy zatem w Europie żyjemy w warunkach nieustannej supresji deszczu?

*Rosenfeld 2000 (Science)*





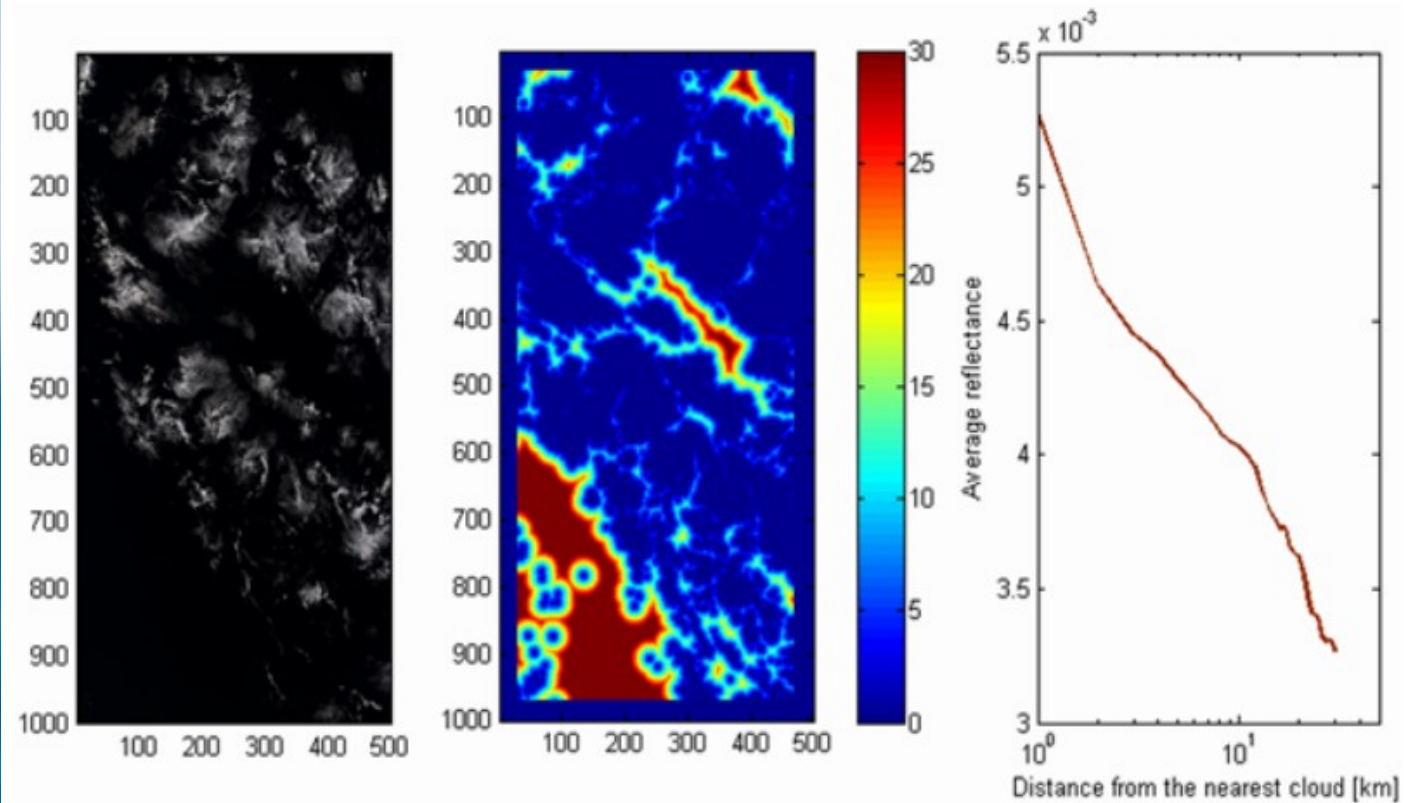
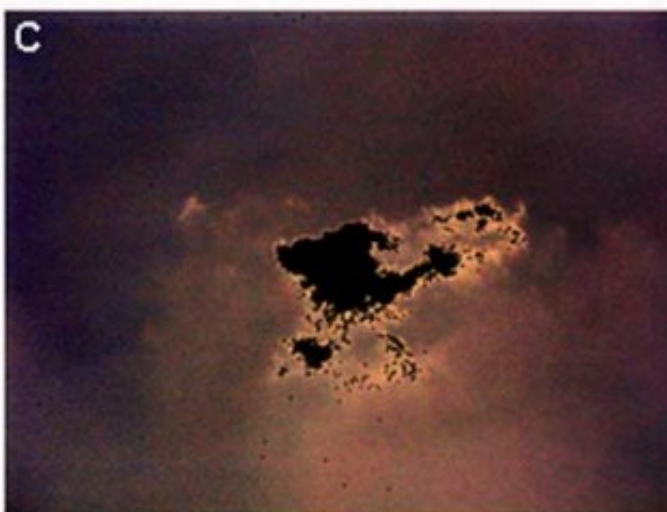
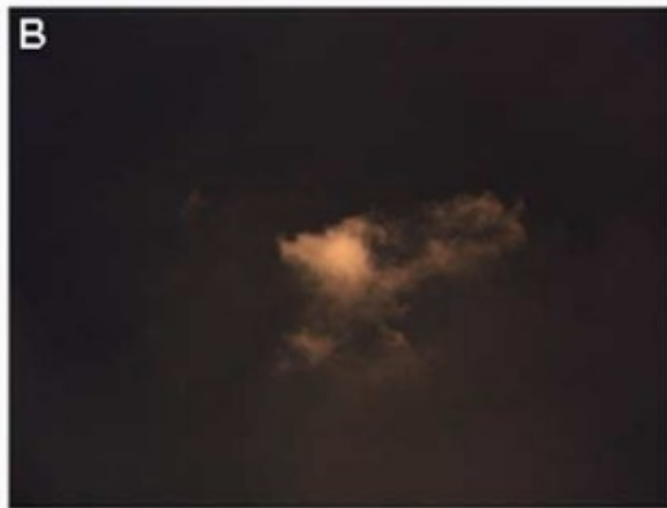
# Wpływ koncentracji aerozolu na pokrycie chmurami i ich wysokość



Rysunek przedstawia pokrycie chmurami (na górze) oraz wysokość szczytu chmur (w jednostkach ciśnienia) dla warunków czystego nieba (po lewej) i mgiełki (haze) sparametryzowanych grubością optyczną aerozolu.

*Koren et al. 2005 (GRL)*

# Chmury i aerozol: strefa mroku



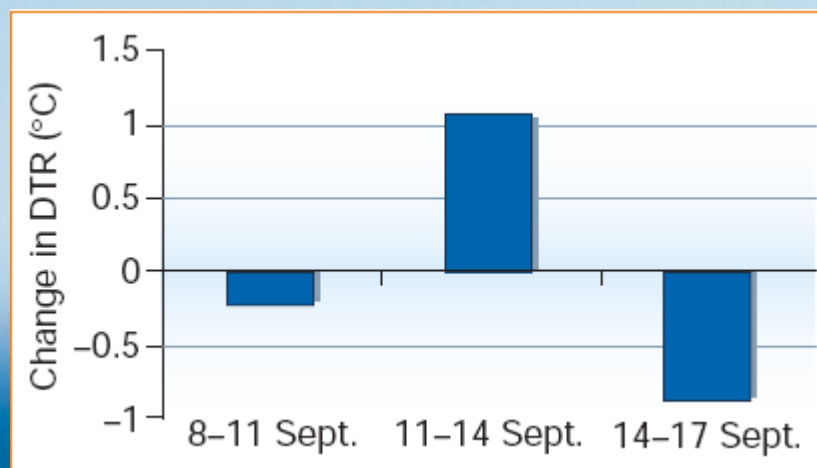
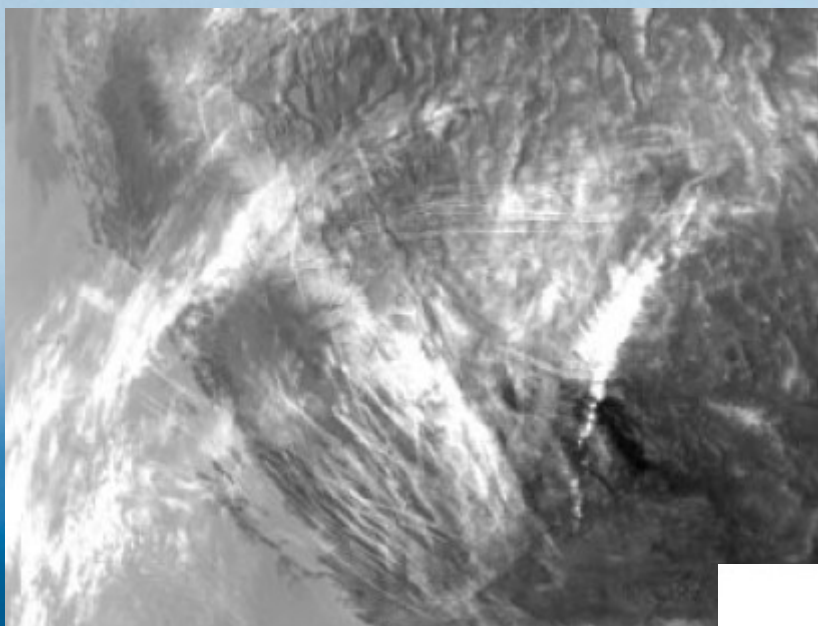
Odjęcie uśrednionego tła (b) i wycięcie chmury (c) z cyfrowego zdjęcia nieba (a) pokazuje, że efekt optyczny chmury wykracza nawet o kilometry poza jej obrys.

Na górze: po lewej zdjęcie pola cumulusów nad Atlantykiem, w środku wartości odległości od najbliższej chmury, po prawej reflektancja w funkcji odległości od chmury. Jak widać aerozol i chmury to bardzo związane zjawiska.

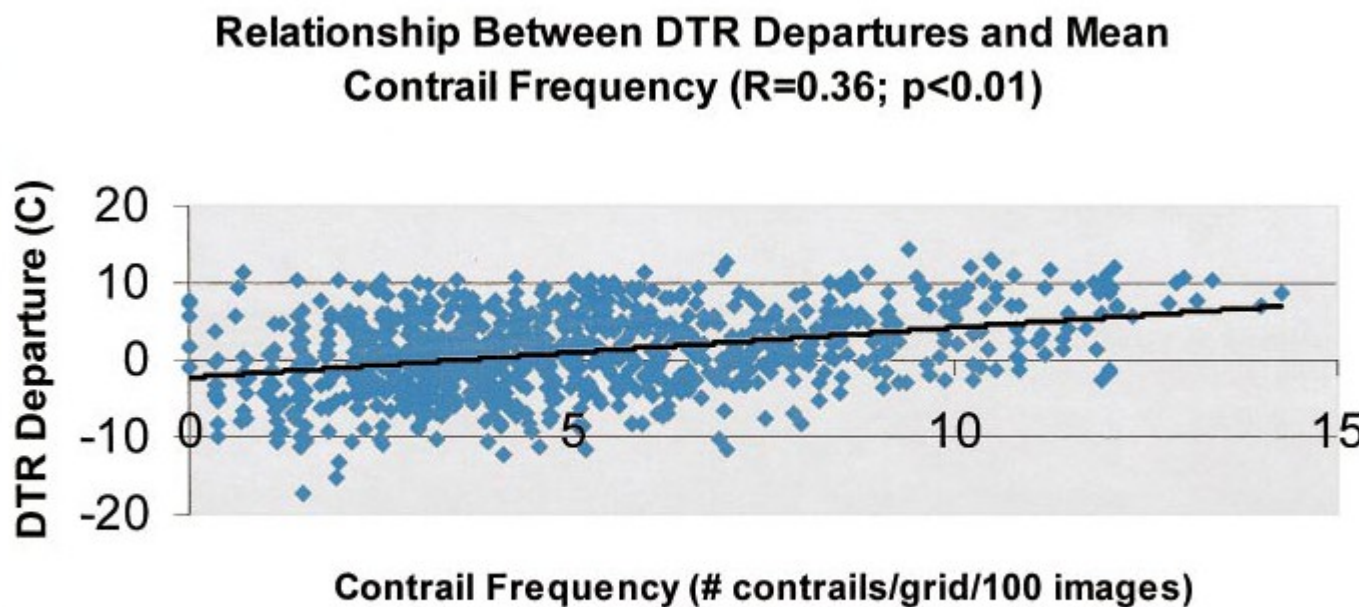
*Koren et al. 2007 (GRL)*



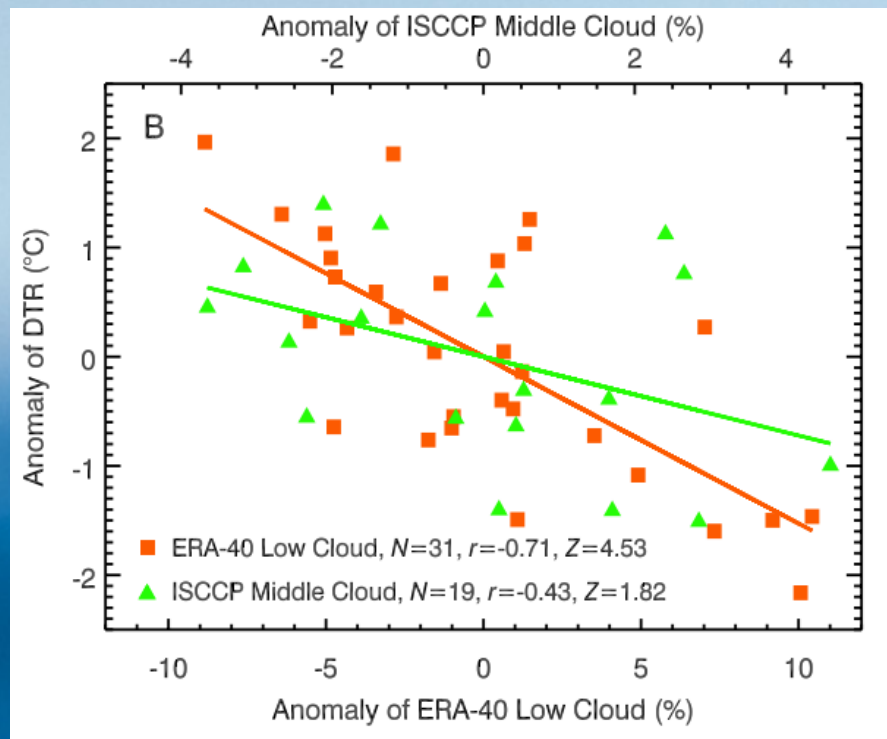
# Samoloty też zostawiają ślady ("jet contrails")



Różnica temperatur dzień-noc (DTR) spadła w okresie 3 dni po 11.9.2001, gdy w USA nie latały samoloty pasażerskie o średnio 1.8 stopnia. Przyczyną są ślady po odrzutowcach (*contrails*), których ilość w danym rejonie koreluje ze zmianą DTR 12-14 września 2001.

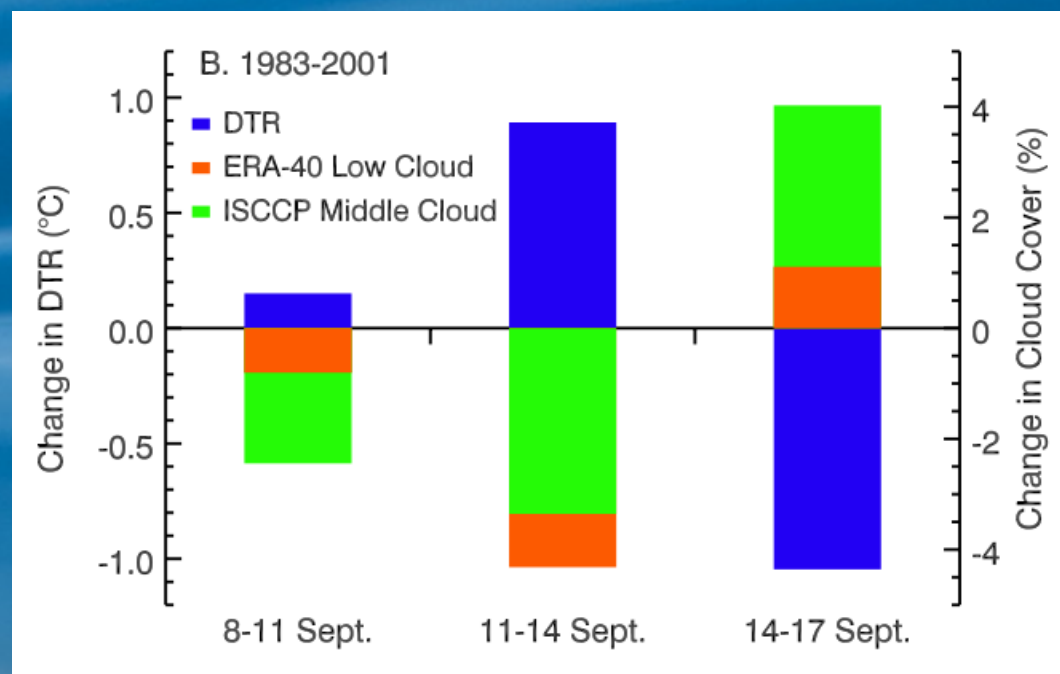


# Ale czy te ślady mają rzeczywiście znaczenie?



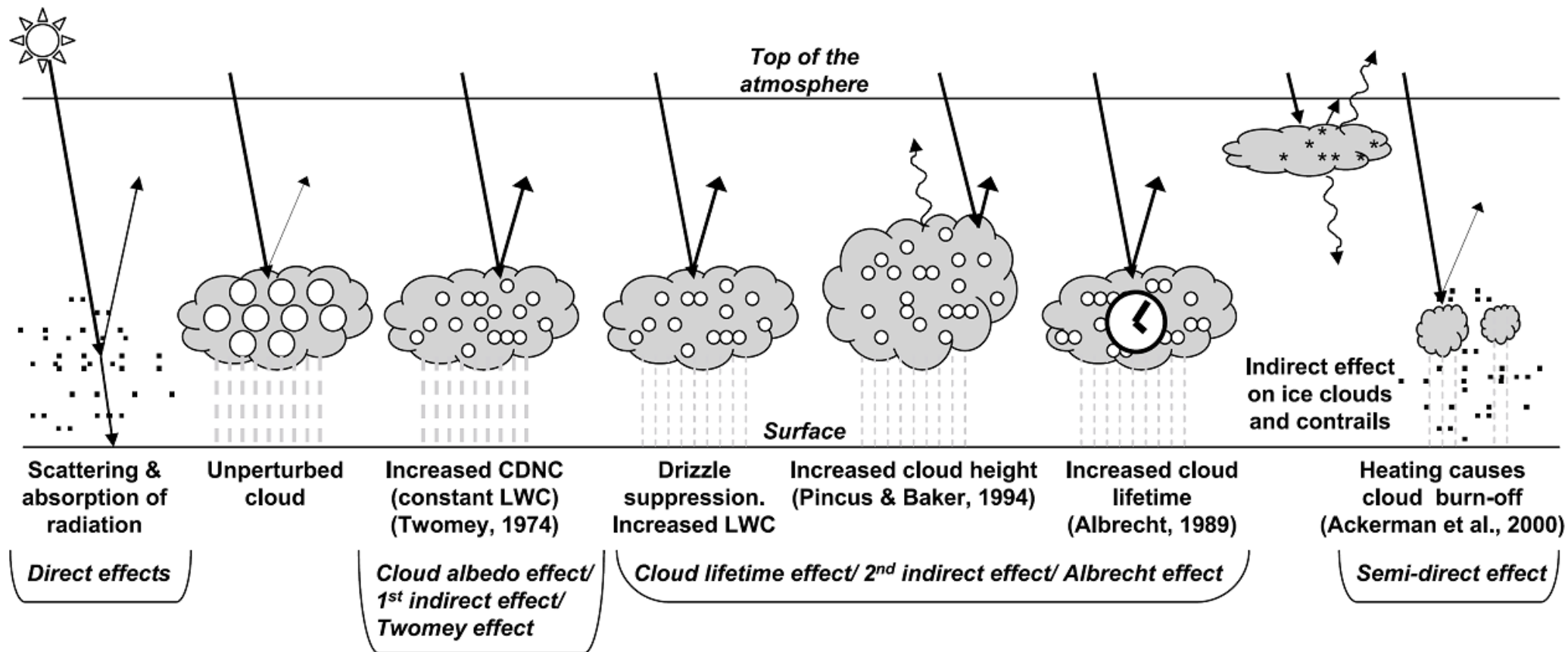
Okazuje się, że w dniach po „9-11” (11-14 września 2001) wystąpiła nad USA ujemna anomalia zarówno niskich jak i średnich chmur. Stawia to w wątpliwość istotność wniosków o wpływie „contraili” na dobowe zakresy temperatur.

Istnieje ujemna korelacja obserwowanych dobowych zakresów temperatur DTR oraz pokrycia nieba chmurami niskimi o średnimi (silniejsza dla średnich – zielona linia na wykresie po lewej).



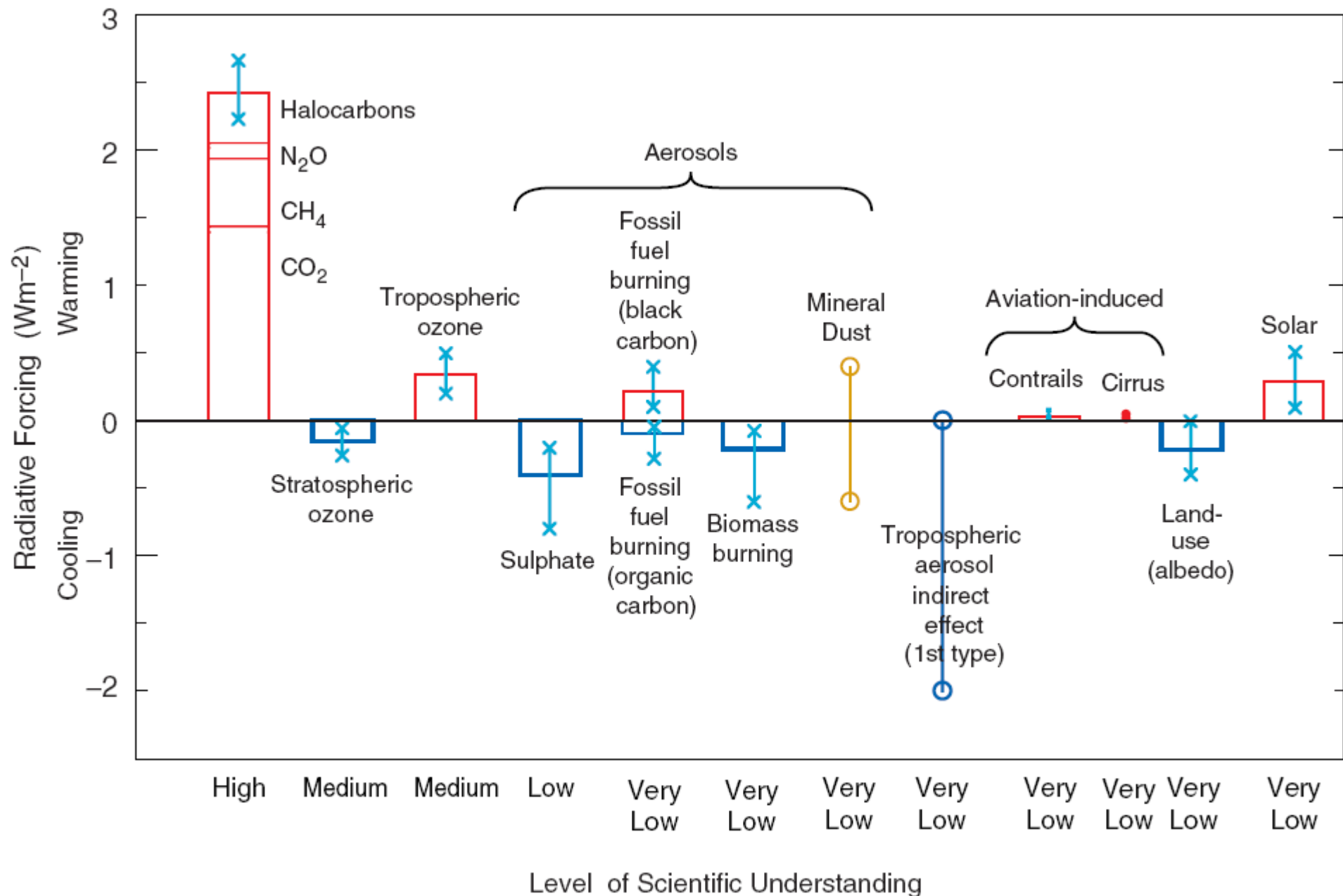


# Wszystkie efekty aerozolu na jednym rysunku



**Figure 2.10.** Schematic diagram showing the various radiative mechanisms associated with cloud effects that have been identified as significant in relation to aerosols (modified from Haywood and Boucher, 2000). The small black dots represent aerosol particles; the larger open circles cloud droplets. Straight lines represent the incident and reflected solar radiation, and wavy lines represent terrestrial radiation. The filled white circles indicate cloud droplet number concentration (CDNC). The unperturbed cloud contains larger cloud drops as only natural aerosols are available as cloud condensation nuclei, while the perturbed cloud contains a greater number of smaller cloud drops as both natural and anthropogenic aerosols are available as cloud condensation nuclei (CCN). The vertical grey dashes represent rainfall, and LWC refers to the liquid water content.

# Raport IPCC: stan wiedzy na rok 2001





## Podsumowanie 1/3

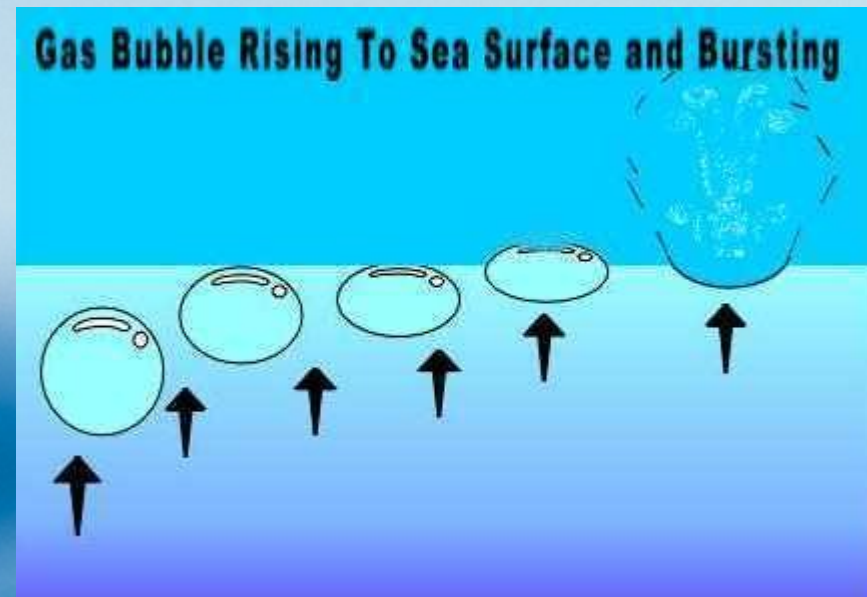
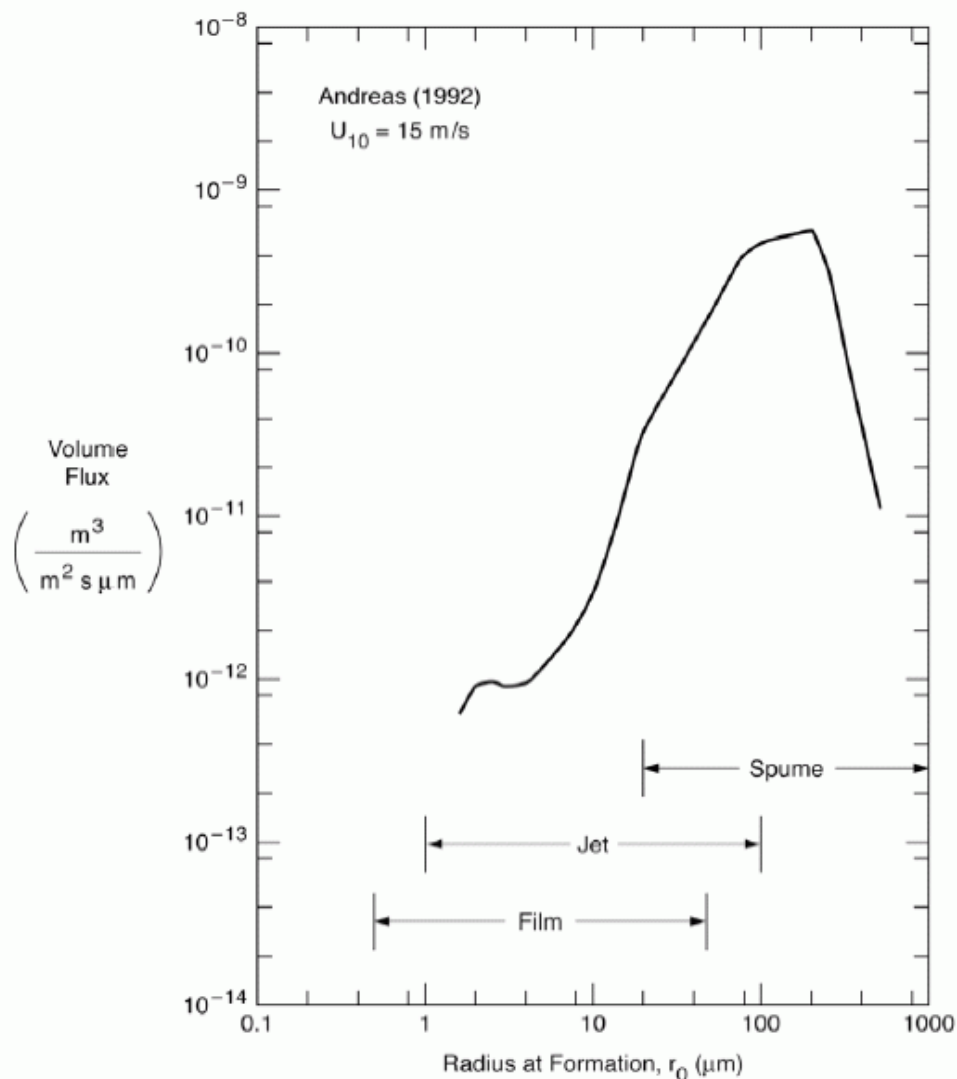
Aerozol pełni istotną rolę klimatyczną:

- Odbijając promieniowanie słoneczne oziębiają zarówno powierzchnię ziemi jak i atmosferę. Kilkanaście lat temu sądzono że to działanie (“efekt bezpośredni”) aerozolu zawdzięczamy wyłącznie związkom siarki. Obecnie ważą się, że także pyłowi z pustyń i soli z aerozolu morskiego.
- Dostarczając chmurom dodatkowych jąder kondensacji kropel, powodując przez to większą grubość optyczną chmury (większe odbicie dodatkowo chłodzące powierzchnię ziemi). Jest to tzw. „pierwszy pośredni” efekt aerozolu.
- Zmniejszając wielkość kropel w chmurach utrudniają tworzenie opadu (deszczu i śniegu), zwiększając tym samym czas życia chmur i jeszcze bardziej oziębiając powierzchnię ziemi (tzw. “drugi pośredni” efekt aerozolu)
- Poprzez absorpcję ogrzewa atmosferę (jednak chłodząc powierzchnię ziemi). Może to doprowadzić do zmniejszenia ilości chmur (tzw. “efekt pół-bezpośredni”), szczególnie w tropikach.



*Nie o taki aerozol nam chodzi –  
choć na konferencjach  
aerozolowych przeważają  
aerozole przemysłowe i medyczne.*

# Mechanizmy generacji aerozolu morskiego

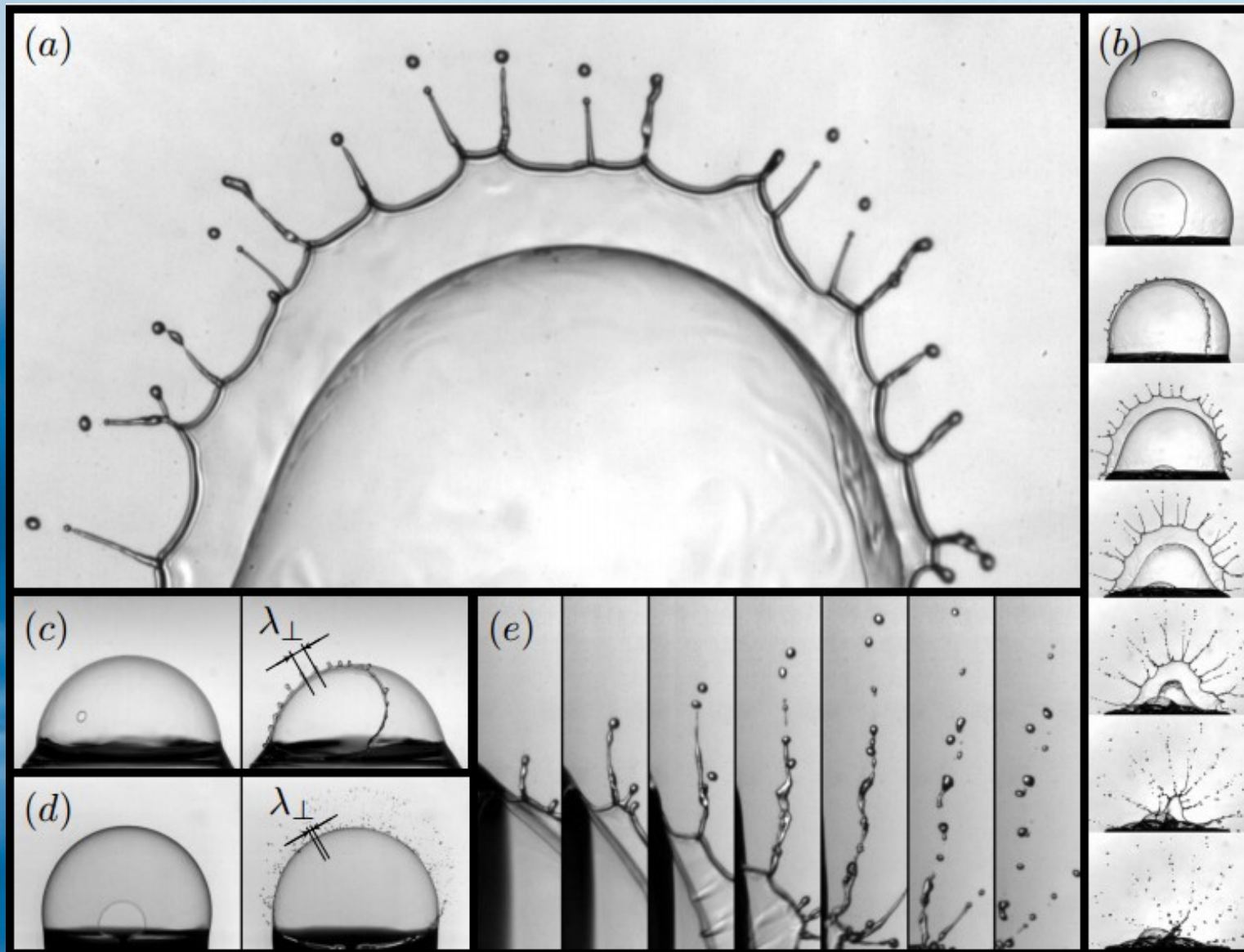


Przy prędkościach wiatru  $U = 5 - 10 \text{ m/s}$  aerozol morski generowany jest głównie przez pękanie pęcherzyków powietrza powstających przy łamaniu fal. Powyżej  $10 \text{ m/s}$  rozpoczyna się zwiewanie wody z grzyw fal (*spume mechanism*).

*Andreas "A review of sea spray generation function for the open ocean", Skipton, 2004*



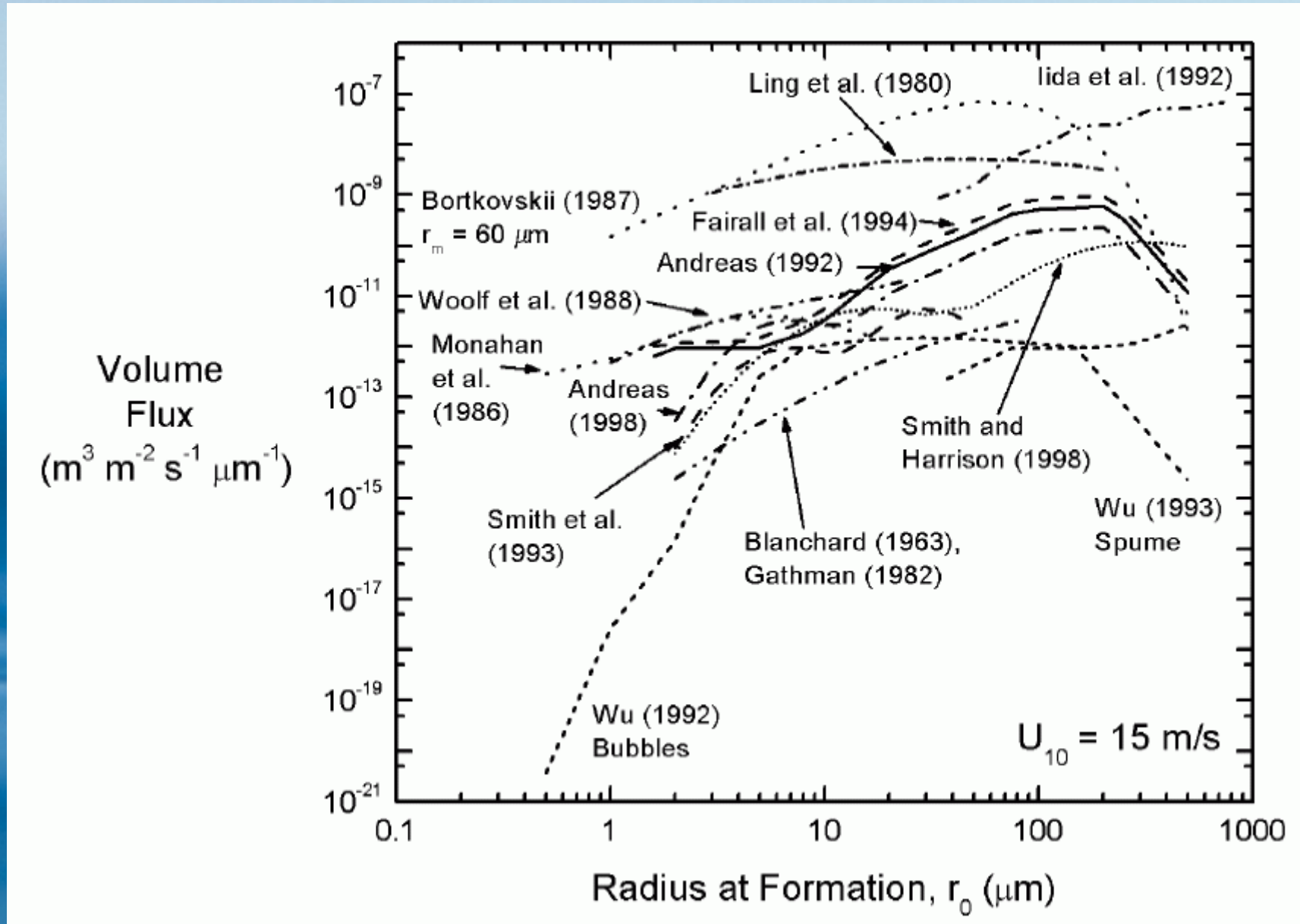
# Skąd tak wiele drobnych kropelek?



Pękanie pęcherzyka polega na podzieleniu błonki na cienkie włókna, z których każde z kolei dzieli się na kilkadziesiąt kropelek. Mechanizm ten poznano dopiero kilka lat temu.

*Lhuissier & Villerraux 2009 (Physics of Fluids)*

# Zakres zmienności postulowanych funkcji strumieni aerozolu

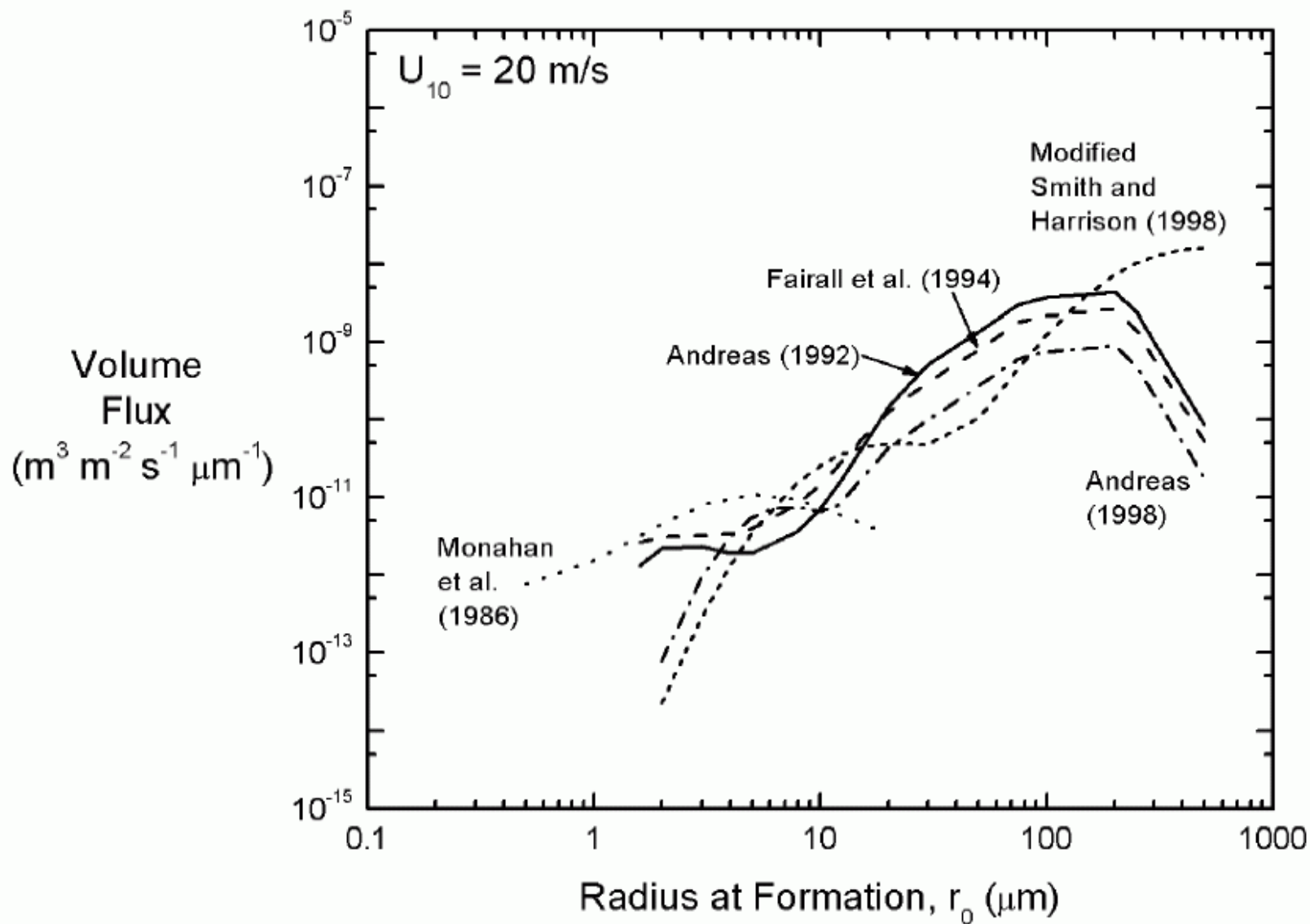


Rozbieżności w szacunku generacji aerozolu morskiego sięgają 6 rzędów

*Andreas "A review of sea spray generation function for the open ocean", Skipton, 2004*



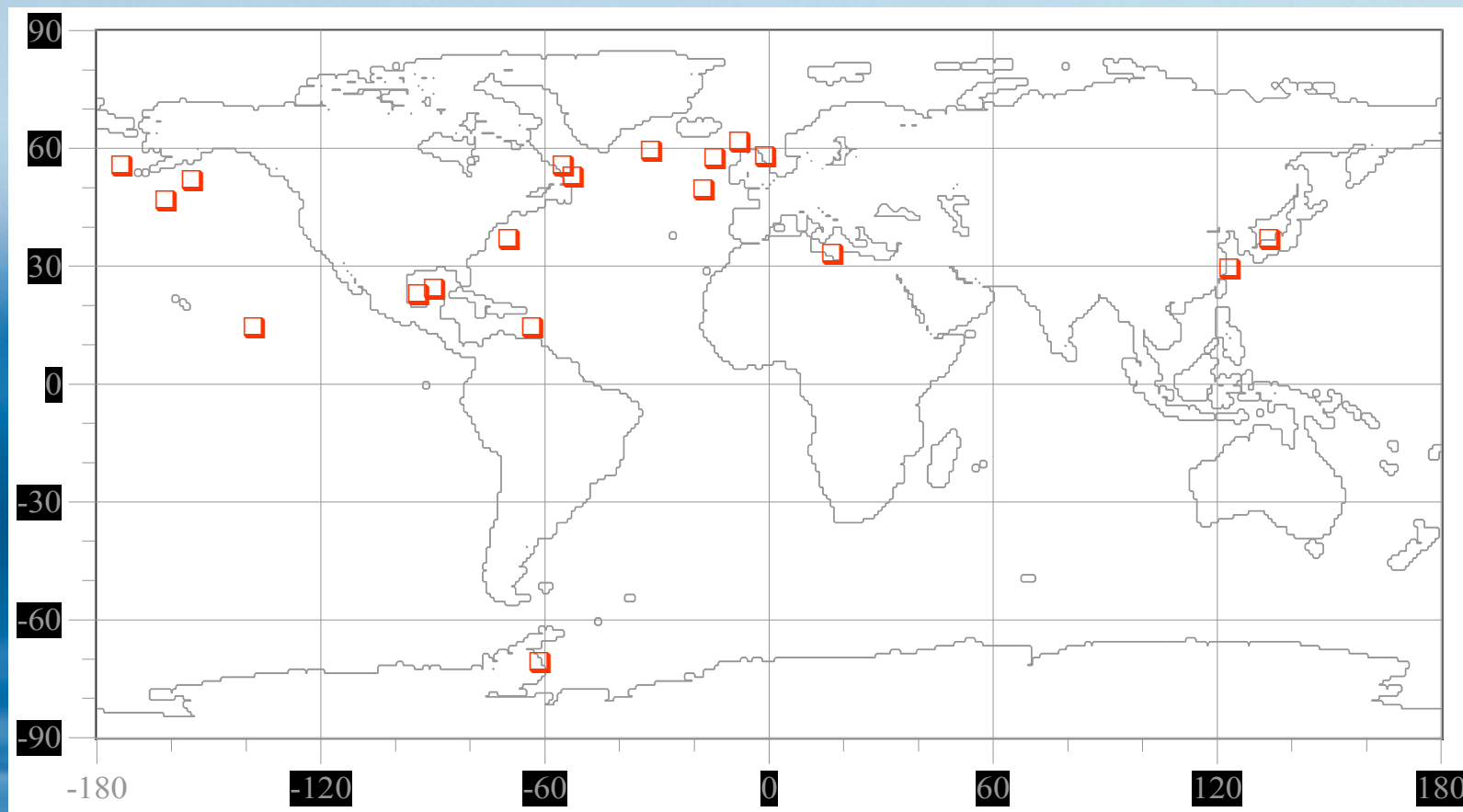
# Produkcja aerozolu: proporcjonalna do sześciangu prędkości wiatru?



Propozycja zawężenia: odrzucenie funkcji skrajnych oraz  
wybranie funkcji proporcjonalnych do  $U^3$

*Andreas "A review of sea spray generation function for the open ocean", Skipton, 2004*

# Czy w ogóle mamy dane z pełnego oceanu?

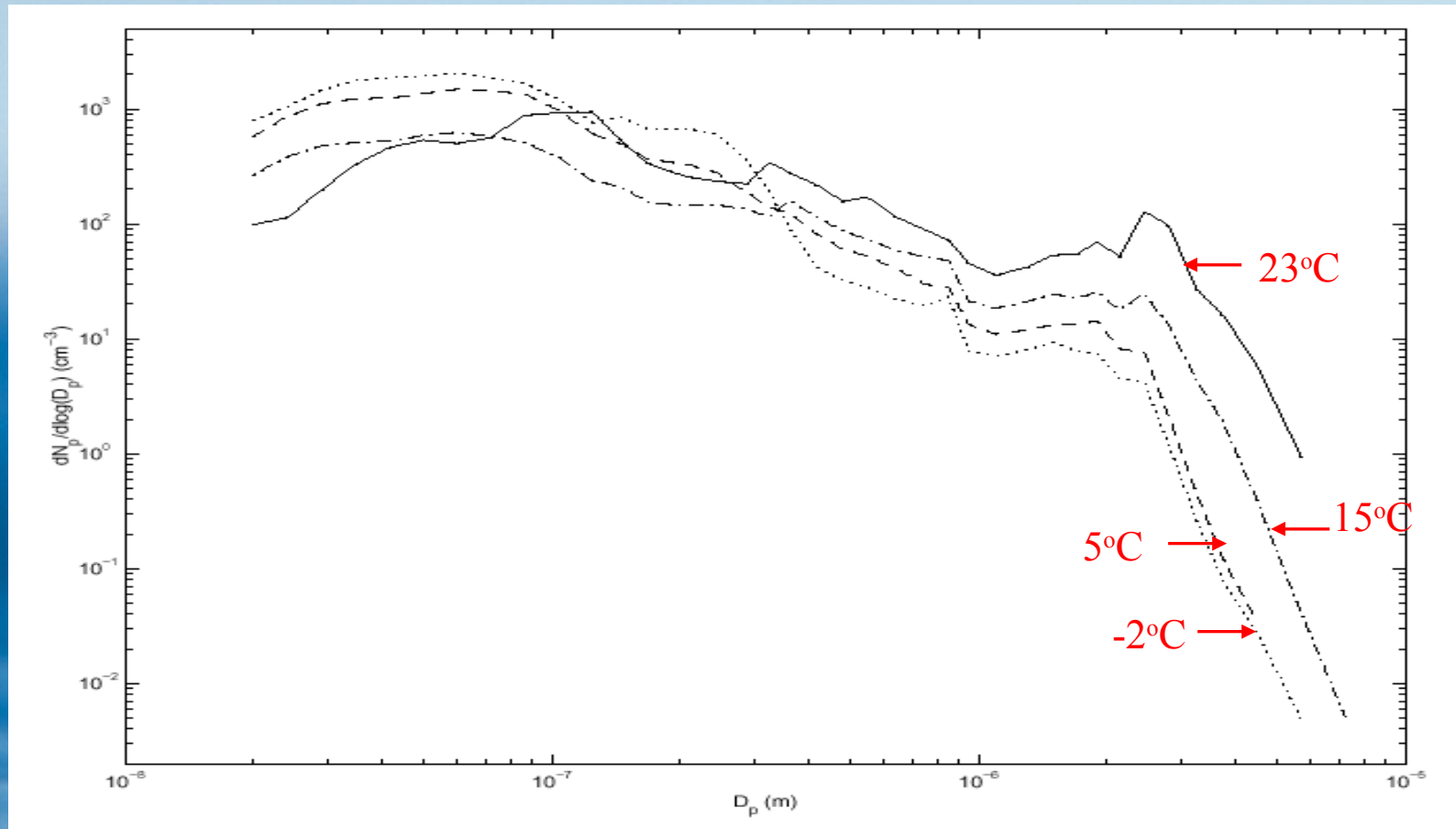


Dysponujemy danymi głównie z mórz przybrzeżnych (szelfowych), większość funkcji produkcji aerozolu dla pełnego morza została stworzona na podstawie eksperymentów z basenach lub na brzegu morskim.

*Anguelova et al. (NRL) "Effects of Environmental Variables in Sea Spray Generation Function via Whitecap Coverage", Skipton, 2004*

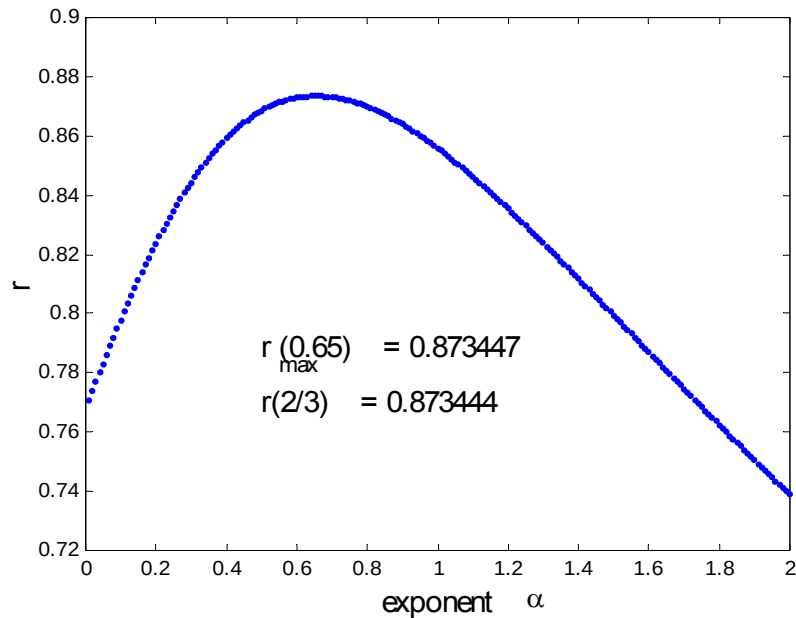


# Zależność funkcji produkcji aerozolu od temperatury



Dodatkową trudnością jest postulowana zależność produkcji aerozolu morskiego od temperatury, zbadana w laboratorium. Jednak czy naprawdę parametrem istotnym jest temperatura, a nie substancje czynne powierzchniowo (“surfaktanty”), pochodzenia biologicznego?

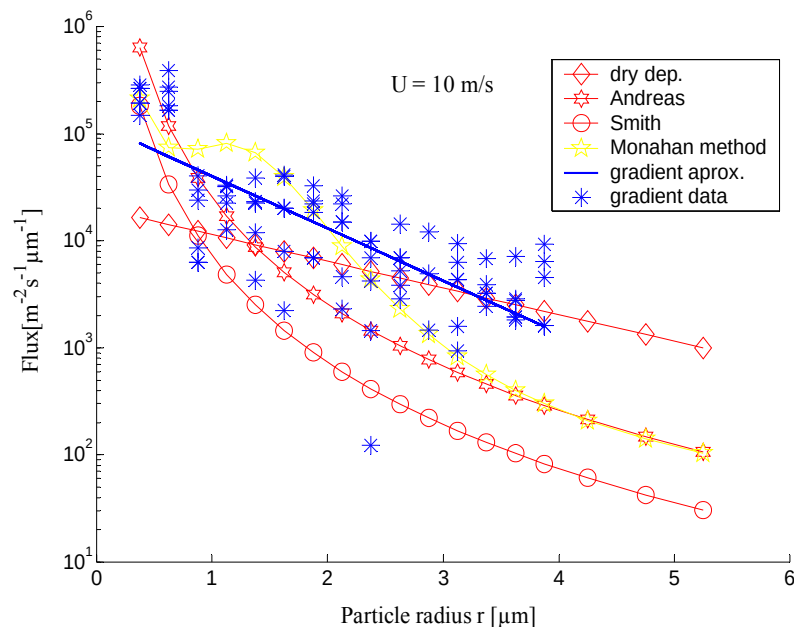
# Badania funkcji produkcji aerozolu w IOPAN



Wieloletnie pomiary funkcji źródłowej aerozolu morskiego z pokładu R/V Oceanii zdają się świadczyć, że:

a) funkcja ta jest proporcjonalna do  $U^2$  (a nie  $U^3$ )

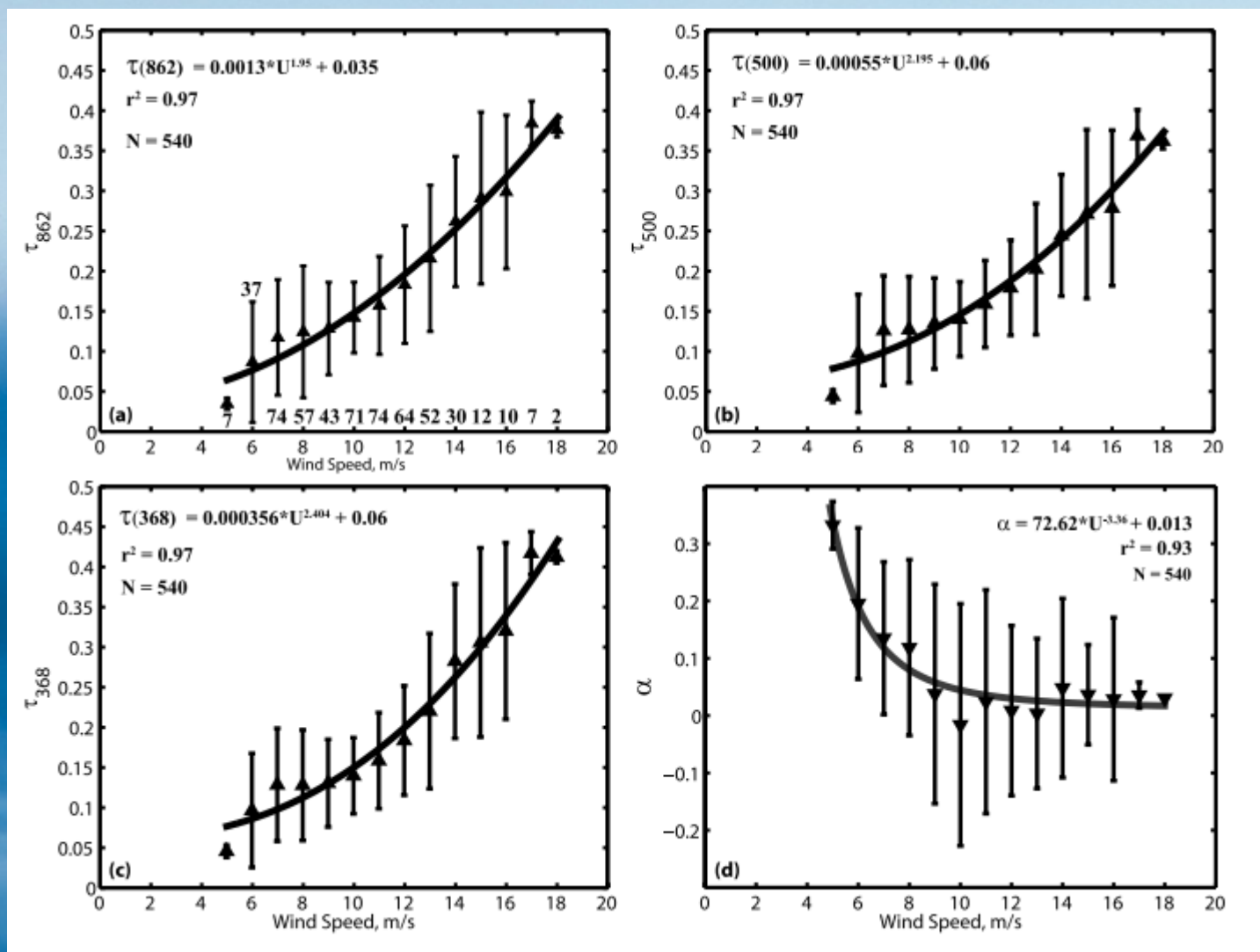
b) najczęściej używane funkcje w literaturze są kilkakrotnie zaniżone przy wiatrach  $< 12$  m/s



*Petelski, Piskozub & Paplińska-Swerpel 2005 (JGR);  
Petelski & Piskozub 2006 (JGR)*

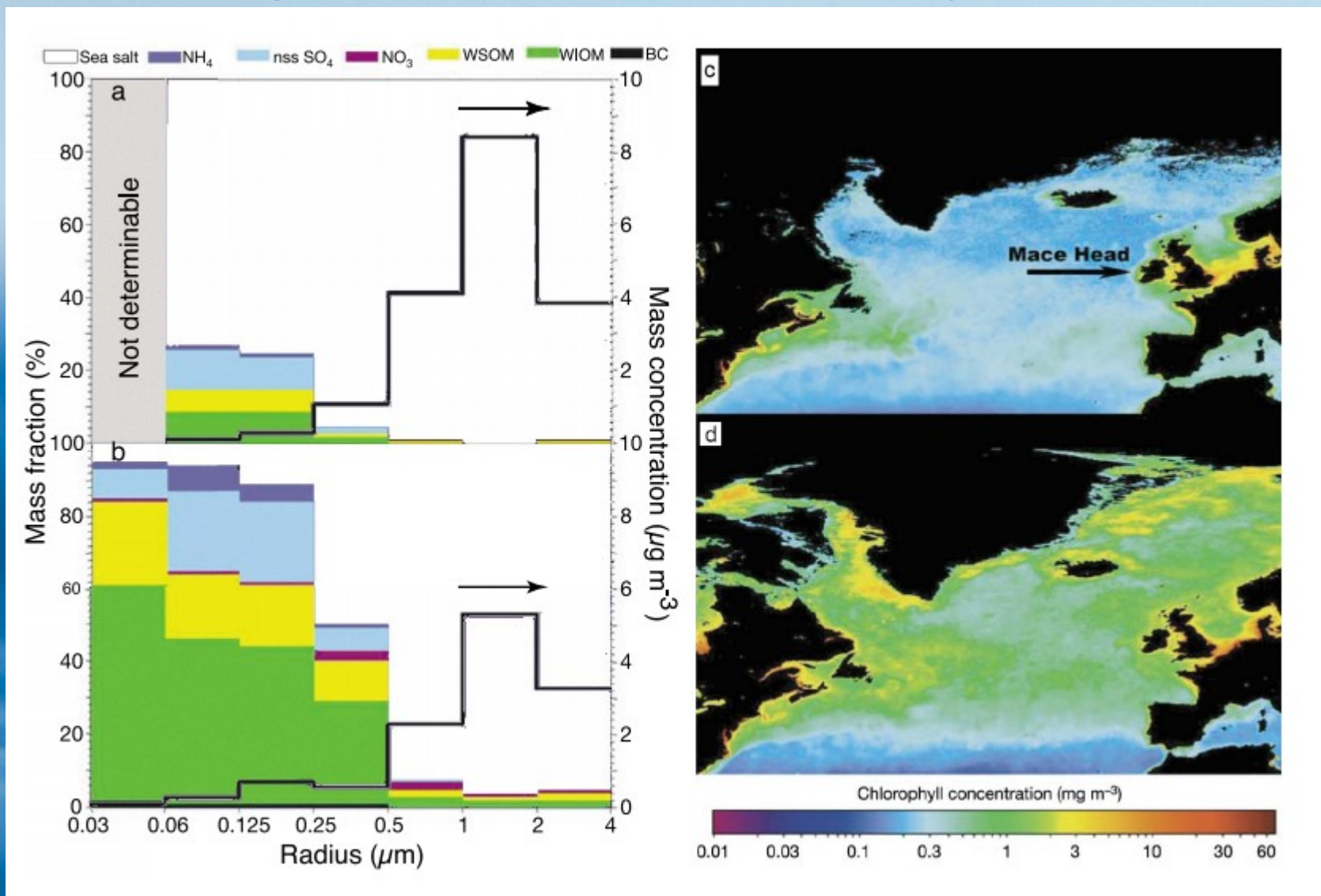


# Zależność grubości optycznej aerozolu morskiego od wiatru



Grubość optyczna aerozolu morskiego nad pn. Atlantykiem mierzona w trzech długościach fal (862, 500 i 368 nm) "fitowana" funkcja potęgowa ma wykładniki odpowiednio 1.95, 2.195 i 2.404 (czwarty panel to nieistotny tu parametr Angstroma). Korelacja dla  $f(U^2)$  wynosiła 0.97.

## Uwaga: Aeroszol morski to nie tylko sól

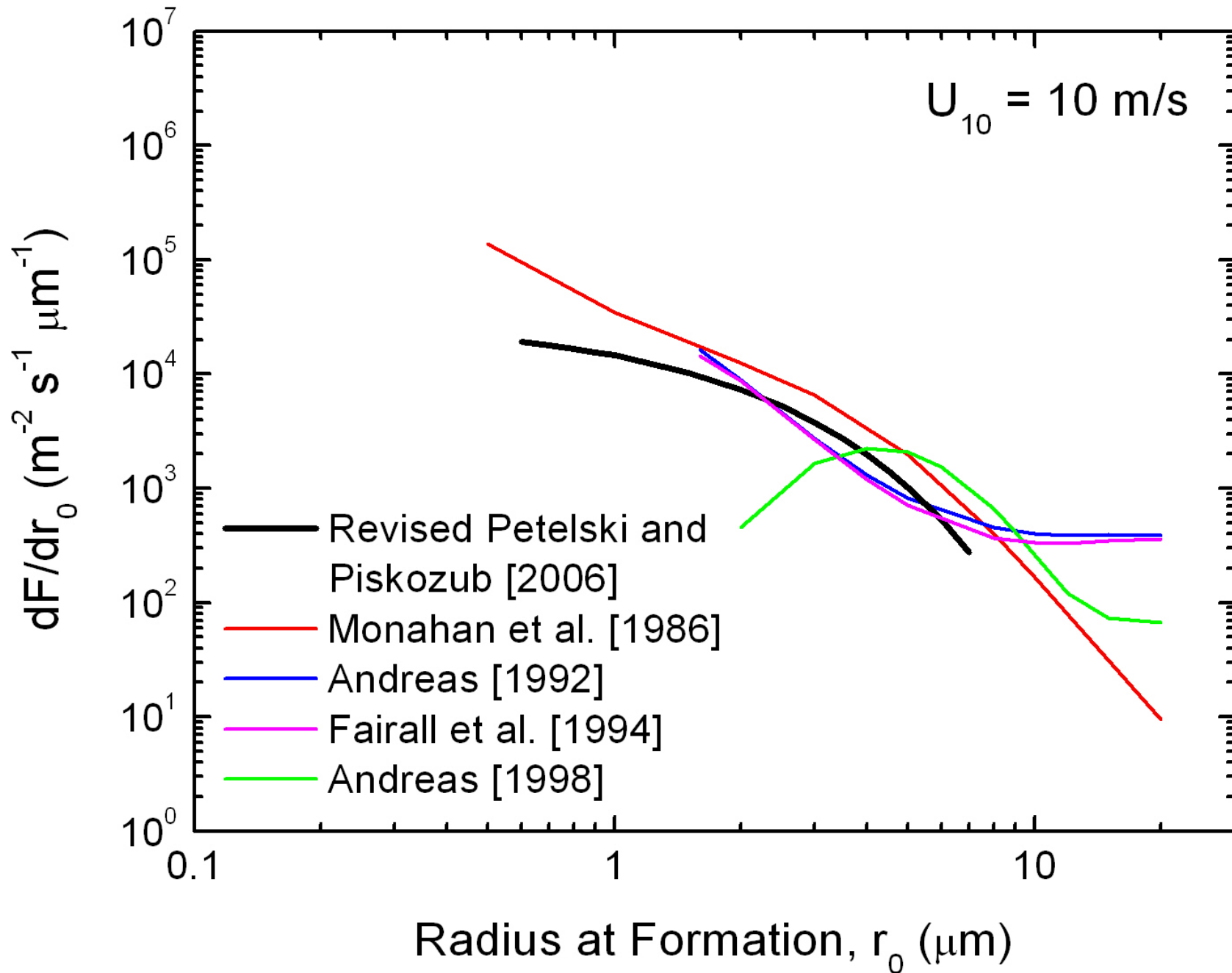


Cząsteczki aerozolu morskiego o wielkości poniżej  $1 \mu\text{m}$  składają się nie tylko z soli (biała) a także ze związków organicznych (inne kolory). W czasie zakwitów (na dole) cząstki submikronowe to prawie sama organika.

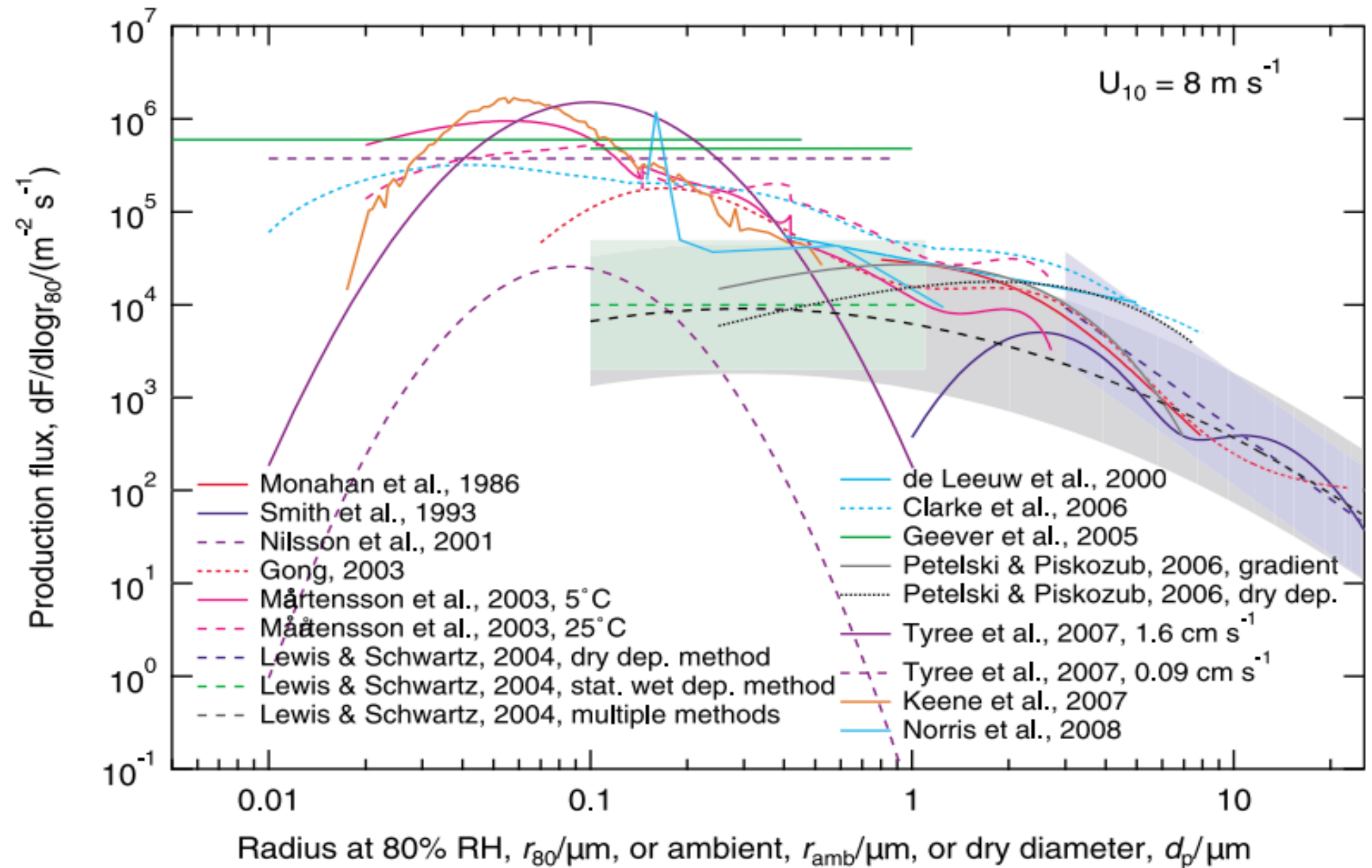
*deLeuw et al. 2011 (Reviews of Geophysics) za O'Dowd et al 2004 (Nature)*



## Czy mamy już consensus? 1/2

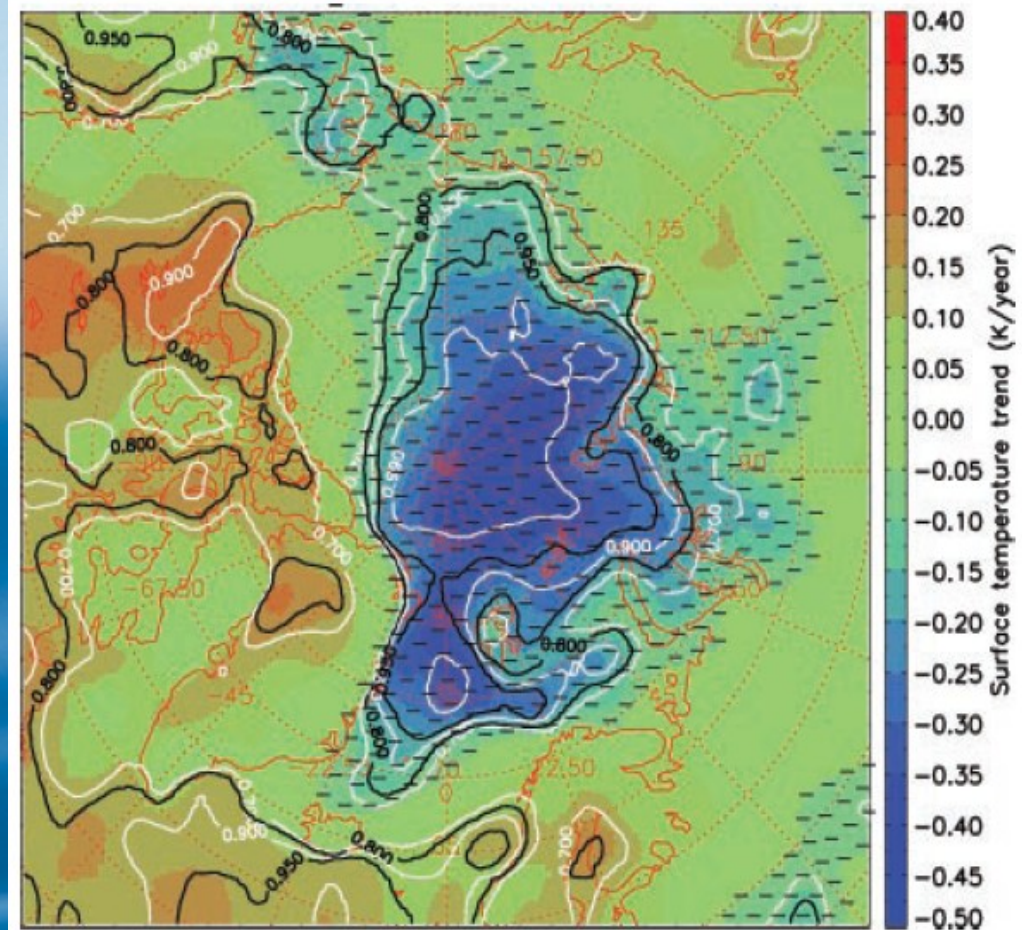
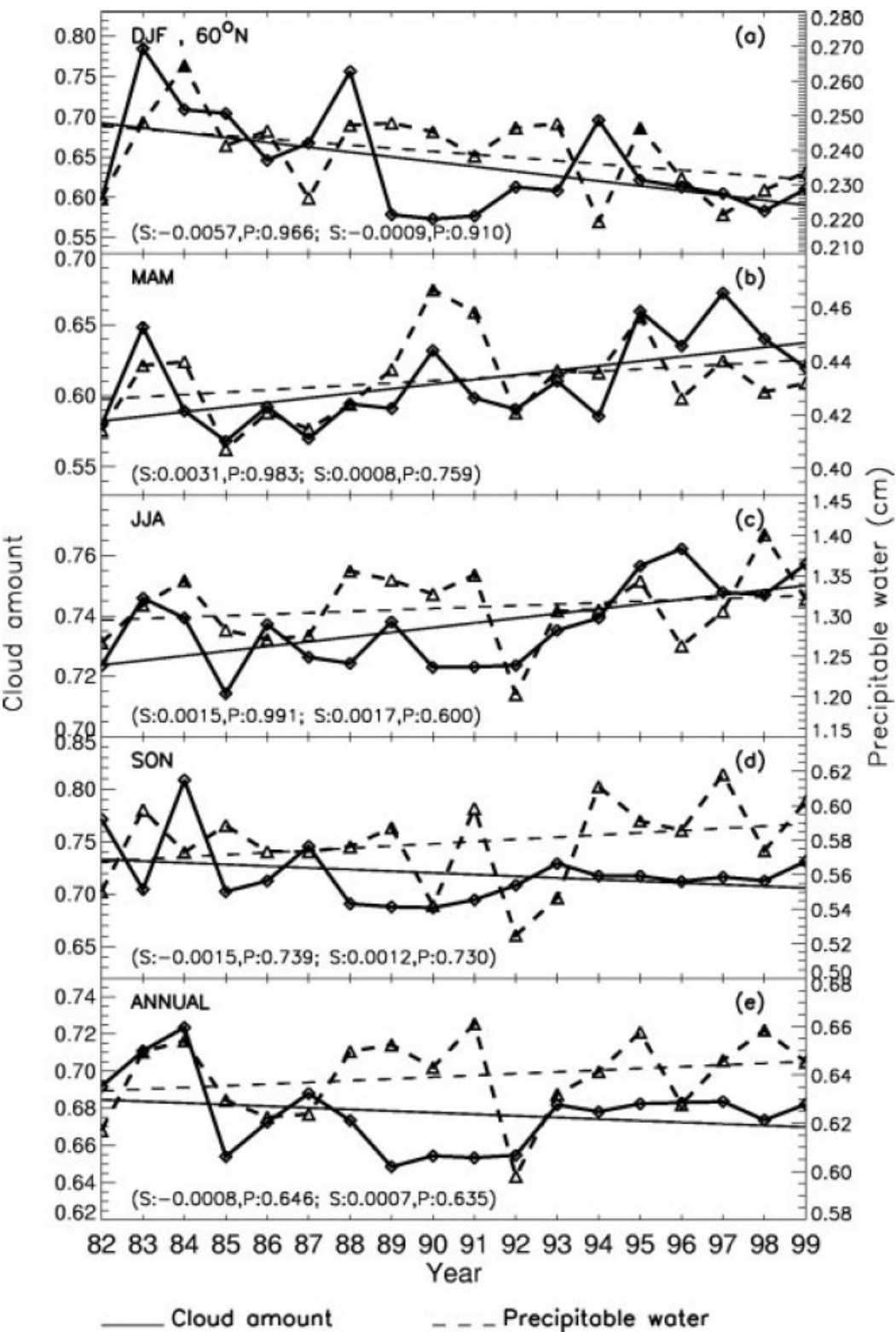


## Czy mamy już consensus? 2/2



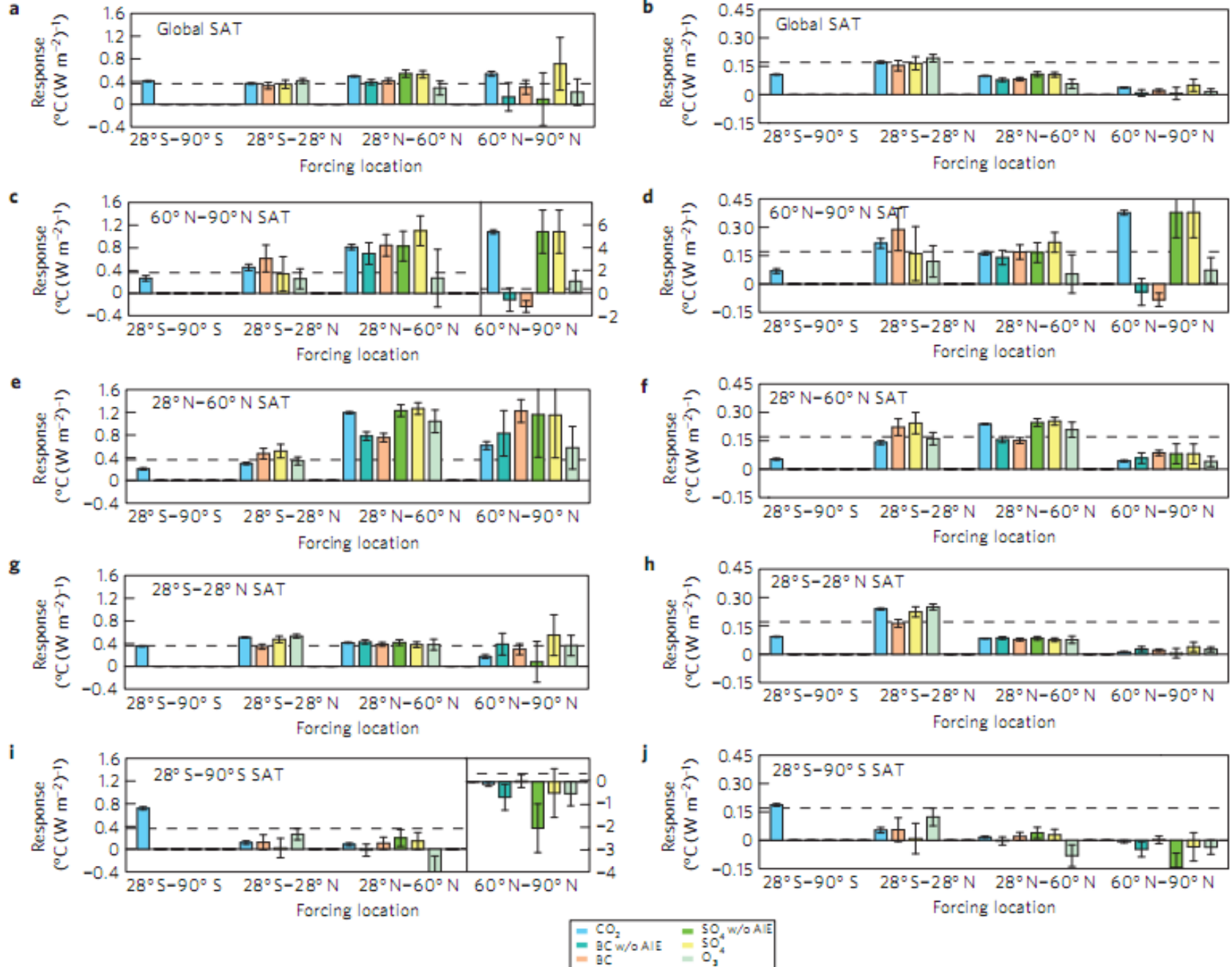


# Zmiany w Arktyce



Obserwacje satelitarne pokazują, że zimą przez ostatnie 20 lat Arktyka staje się coraz zimniejsza (mniej chmur). Wiosną i latem obserwuje się wzrost ilości chmur. Powyżej: trend zmian temperatury Arktyki zimą od 1982 do 1999 r.

*Wang & Key 2003 (Science)*

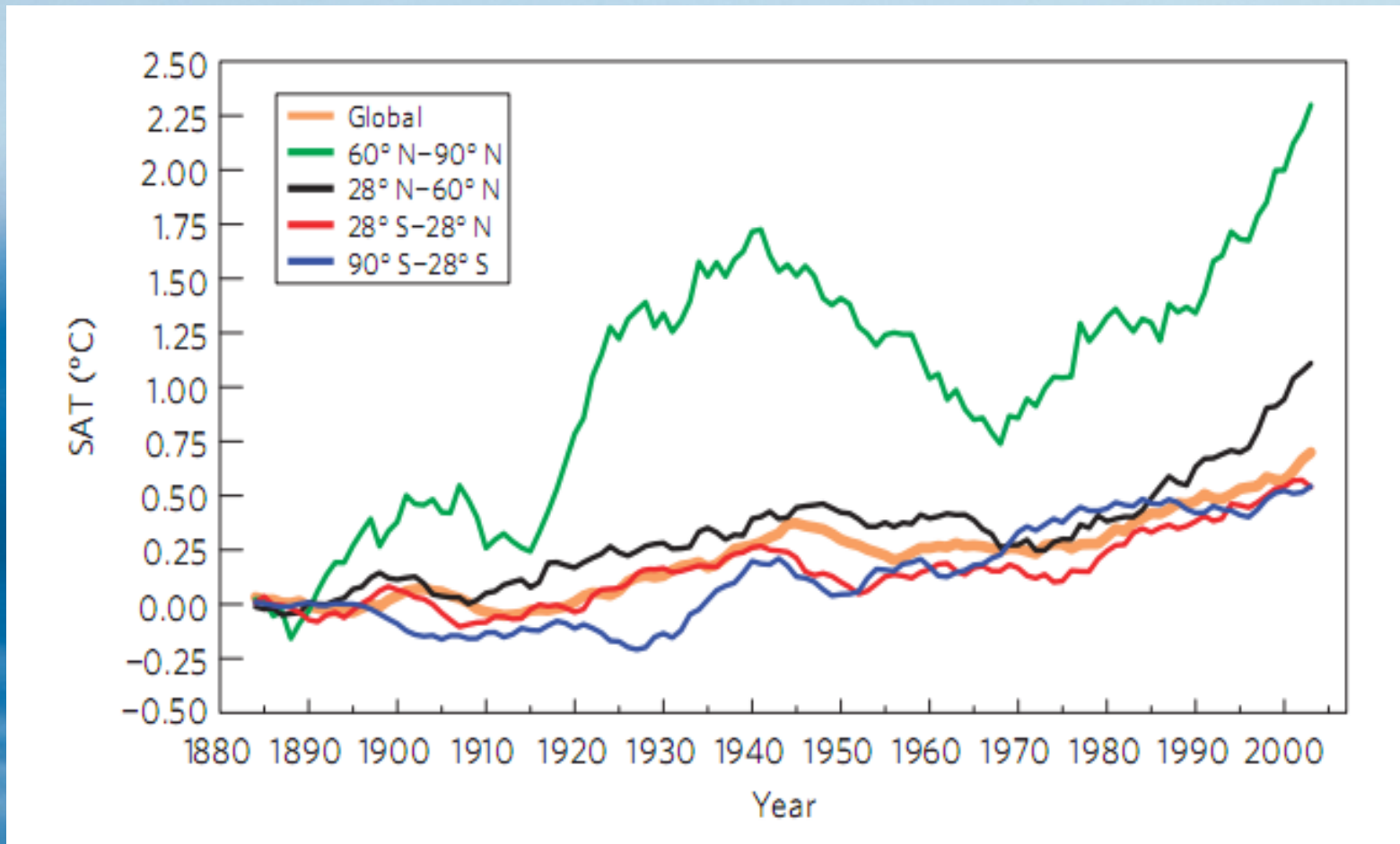


Surface temperature change in a region (top left corner) due to different forcings: CO<sub>2</sub>, black carbon and SO<sub>2</sub> (both without and with indirect effects) and ozone per unit of global forcing (left) and local (right).

*Shindell & Faluvegi 2009 (Nature Geoscience)*

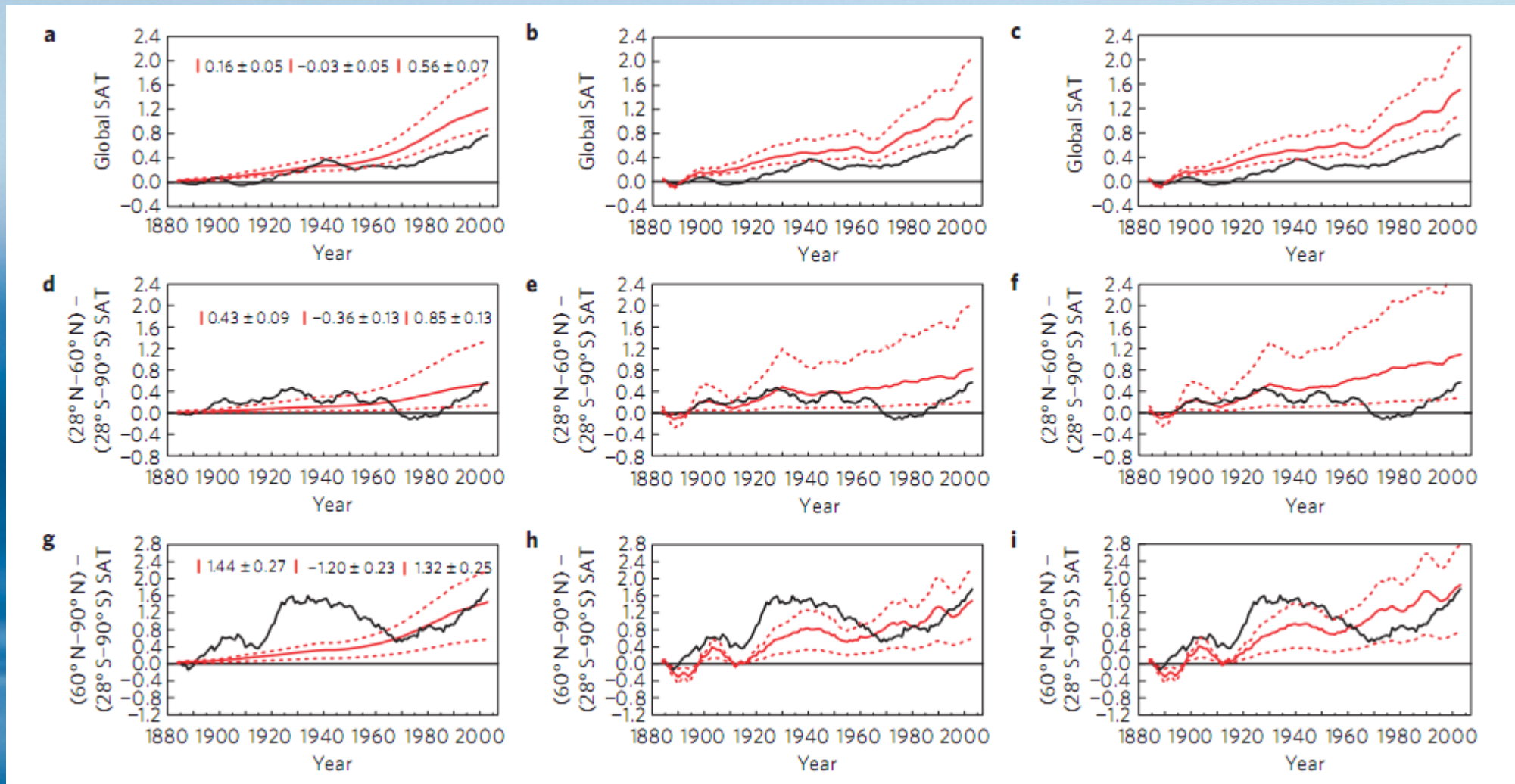


## More warming in the Arctic...



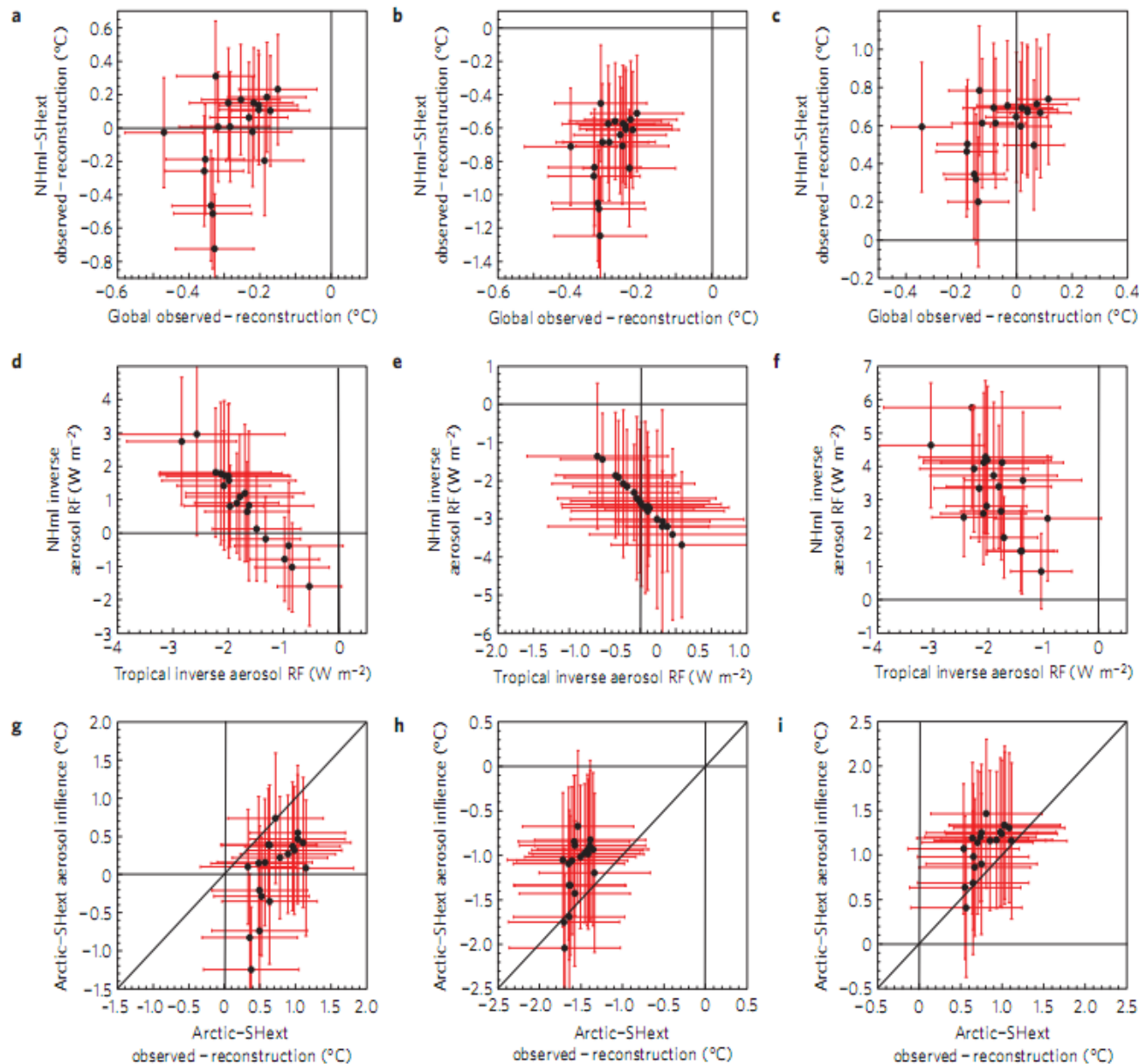
Area-weighted mean observed surface temperatures over the indicated latitude bands.

# Can we explain the temperature values and meridional gradients without aerosol forcings?





# Aerosol direct and indirect forcing

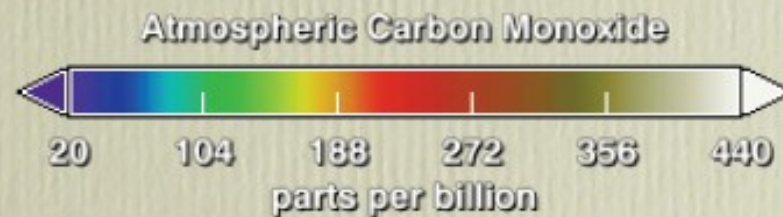
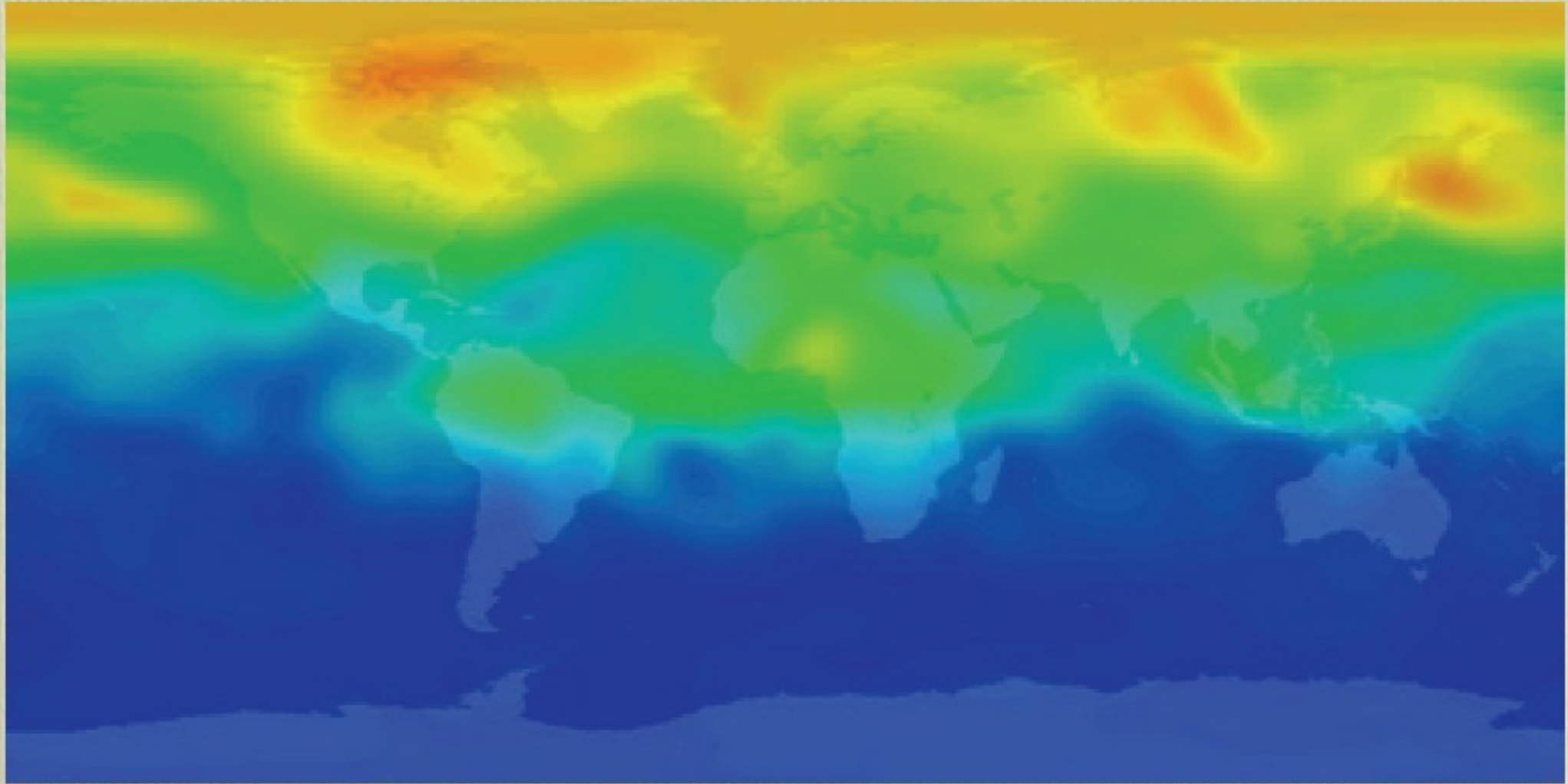


Global mean and regional gradient surface temperature trends derived from observations and 20 models and aerosol forcing estimates. First row: observations minus the reconstructed WMGHG + O<sub>3</sub> (GCNCO) forcing. Second row: regional aerosol forcings (per unit local area) required to match the first row's constraints. Third row: observations minus the reconstructed GCNCO Arctic-SHext gradient compared with the aerosol impact on that gradient. The columns show 1890-1930 (left), 1931-1975 (centre) and 1976-2007 (right).

**Conclusion:** during 1976-2007, we estimate that aerosols contributed  $1.09 \pm 0.81$  °C to the observed Arctic surface temperature increase of  $1.48 \pm 0.28$  °C.

*Shindell & Faluvegi 2009 (Nature Geoscience)*

# MOPITT CO, Mar-Dec 2000, ~5 km

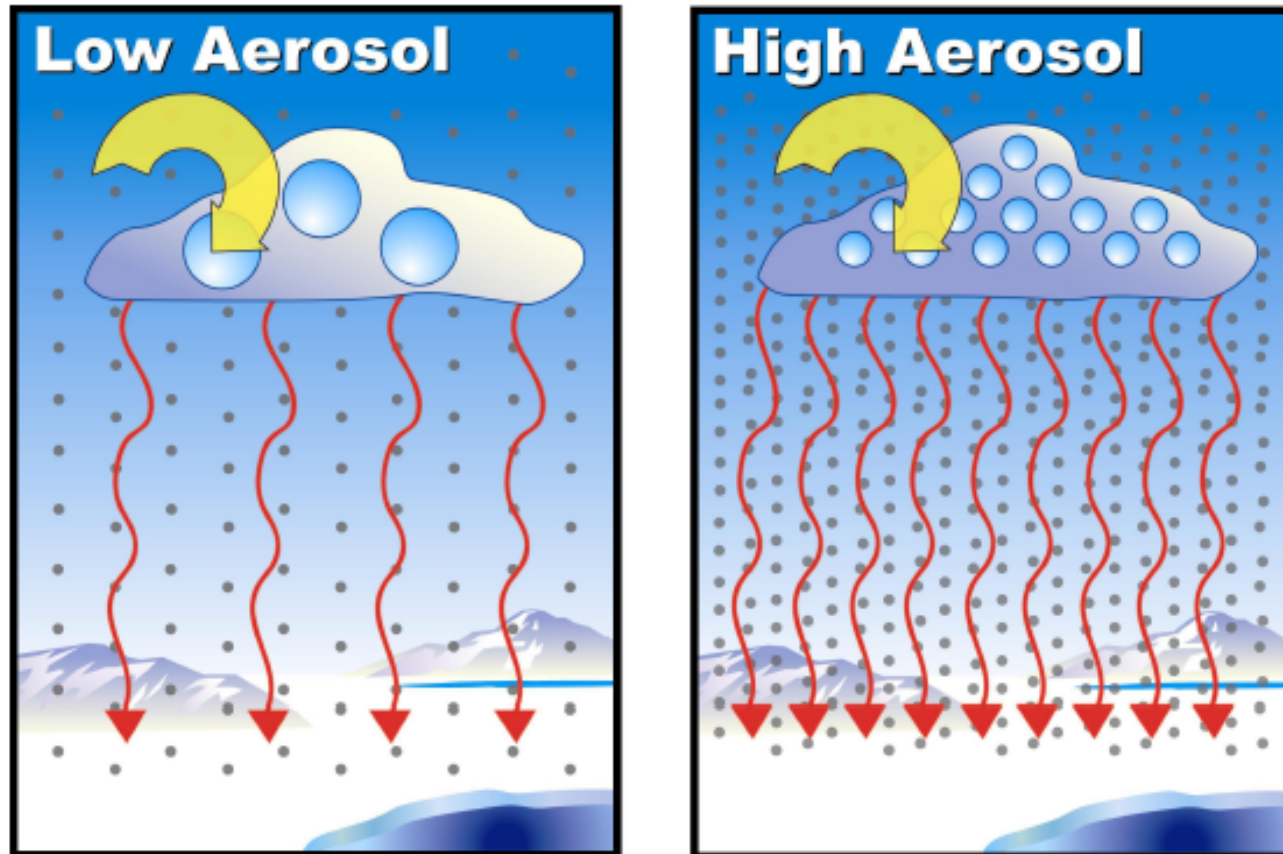


NASA GSFC



# Effect of Arctic Haze Aerosol Particles on the Microphysics of Clouds

*An indirect effect on the atmospheric radiation budget*

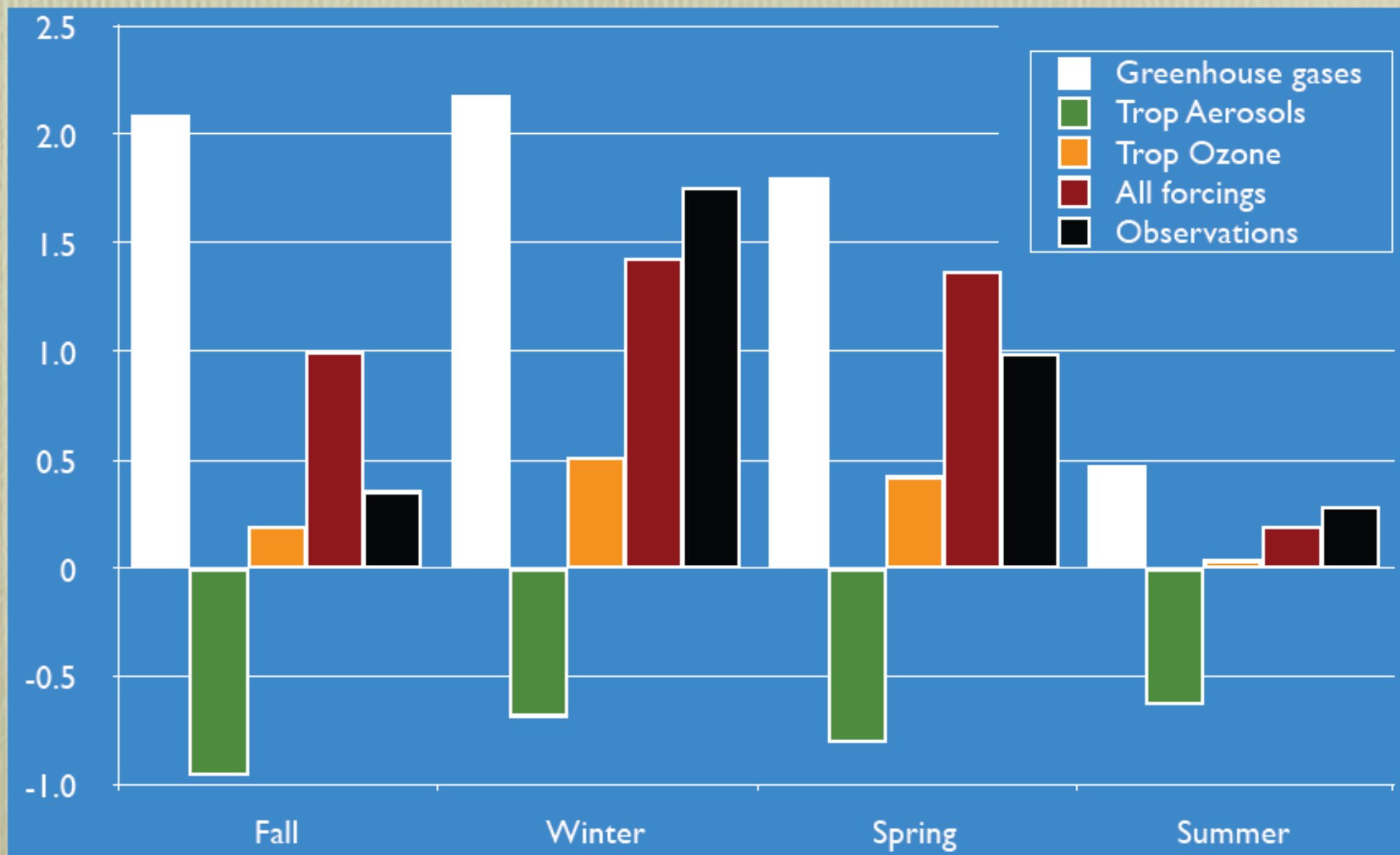


Aerosols serve as cloud condensation nuclei (CCN):

More CCN → more and smaller cloud droplets → greater cloud *emissivity*  
→ cloud radiates more energy to Earth surface → enhances surface warming

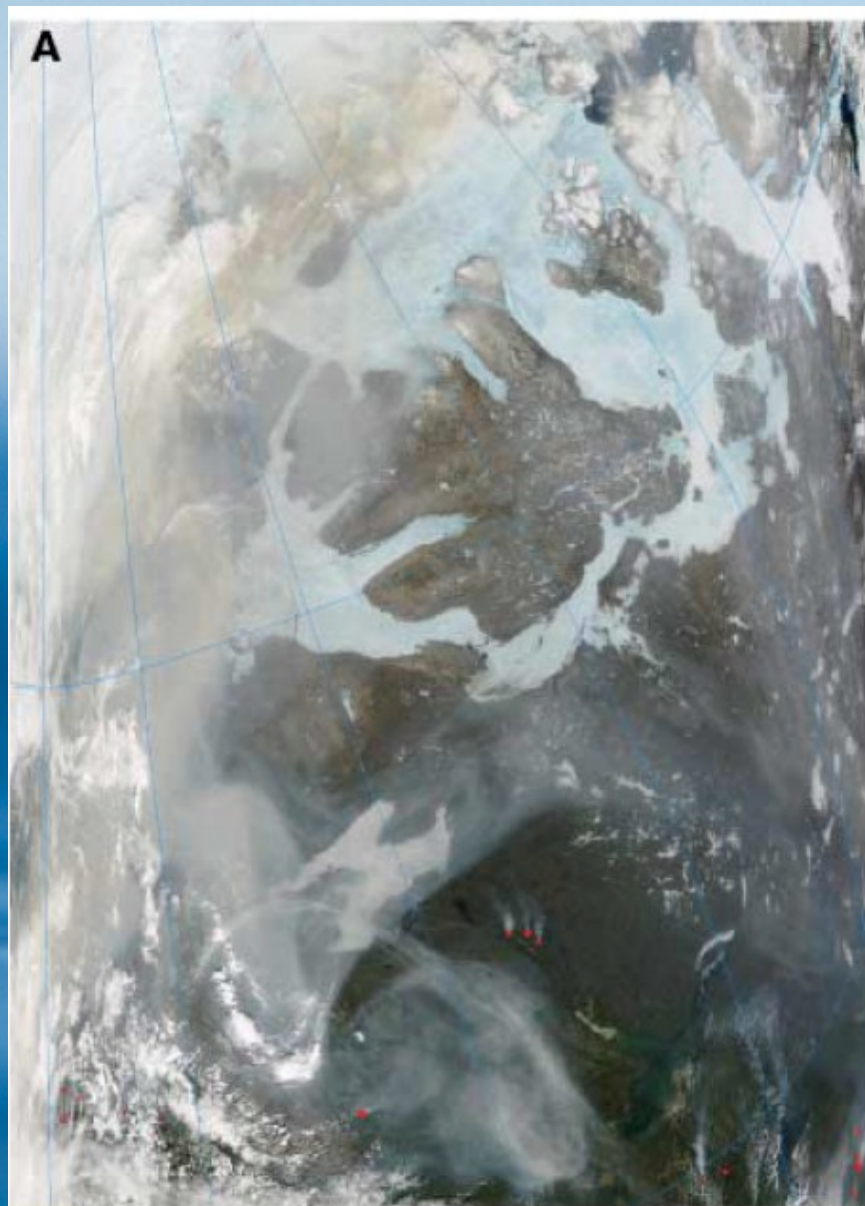
*AMS Congressional Briefing, Dan Lubin, May 31, 2006*

# ***Trends from GISS IPCC AR4 Simulations vs Observations***





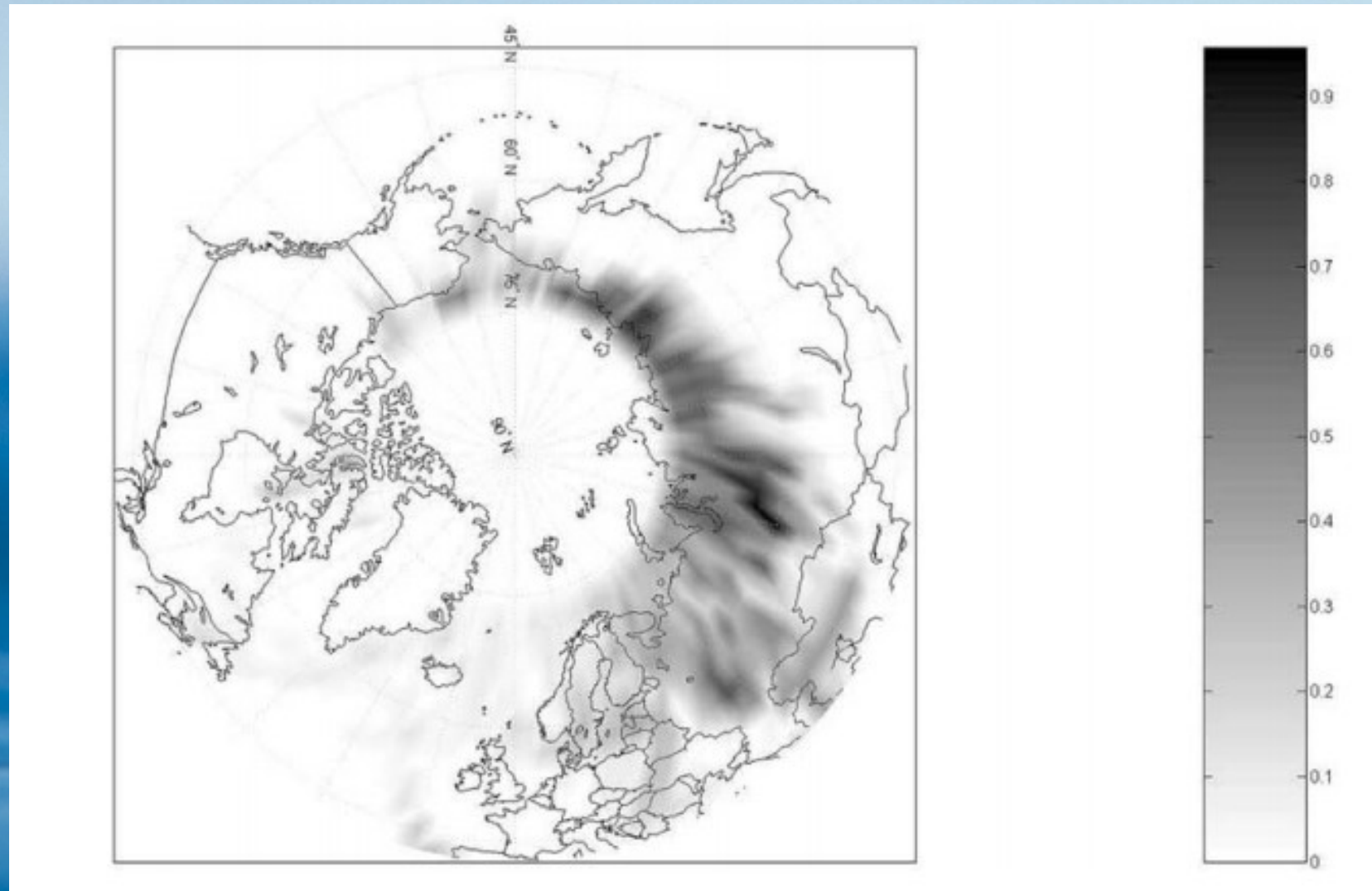
# Arktyczna mgiełka (*Arctic Haze*)



A. Pożary lasów w Kanadzie eksportują aerozol wgłąb Arktyki. B. Czyste powietrze w Ny Alesundzie (26.4.2006) i C. nadejście “mgiełki arktycznej”, tym wypadku zanieczyszczeń znad Rosji (2.5.2006).

*Law & Stohl 2007 (Science)*

# Źródła arktycznej mgiełki



Głównym źródłem aerozolu w arktycznej mgiele jest jednak nie Kanada a Rosja. W połowie roku ważniejszej dla tego wiosennego zjawiska (listopad – kwiecień) analizy trajektorii dla aerozolu zawierającego sadzę wykrytego w Ny Alesundzie pokazują taki obraz prawdopodobnych źródeł.

*Eleftheriadis, Vratolis & Nyeki 2009 (GRL)*



## Udział IOPAN



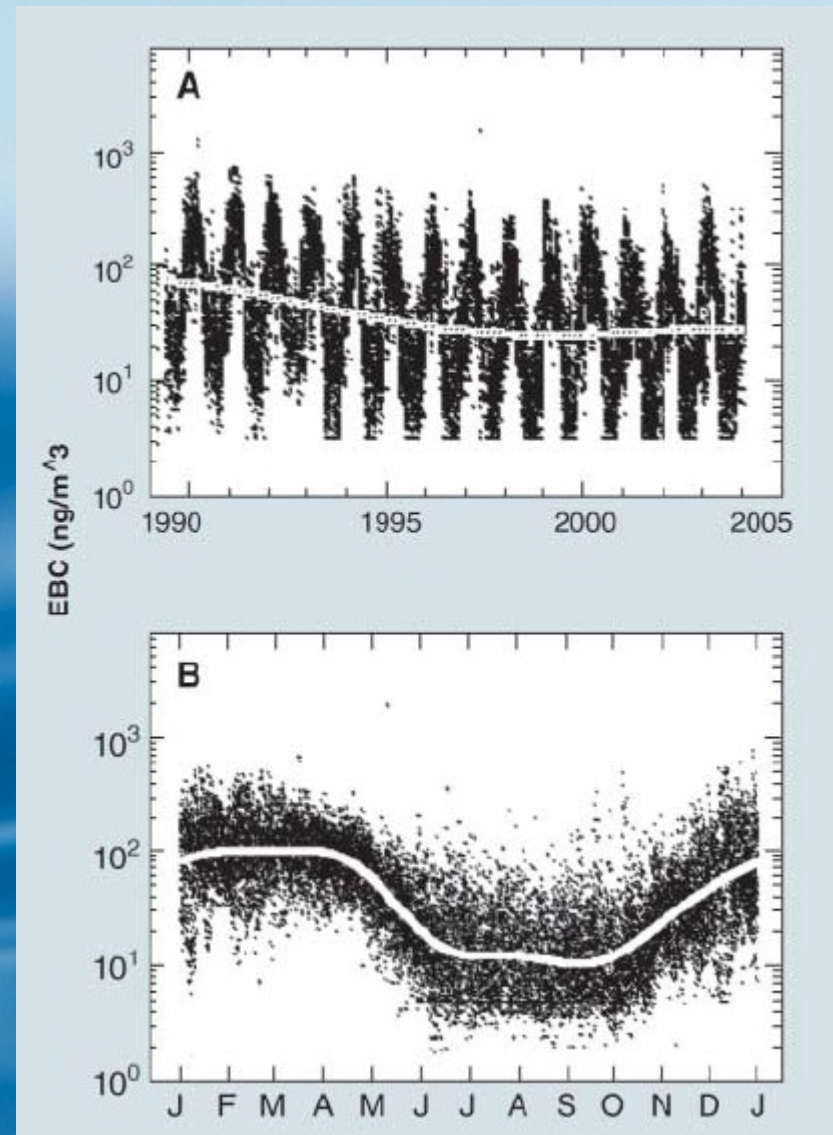
Tymon Zieliński i Tomek Petelski mierzą grubość optyczną atmosfery ręcznymi miernikami Microtops, NY Alesund, 21.03-7.04 2006 r.



## Podsumowanie 2/3

Generacja aerozolu morskiego na pełnym morzu nadal nie jest dobrze zbadana. Jako pierwsze przybliżenie zakłada się zależność strumienia aerozolu od prędkości wiatru  $U$  (pomijając inne parametry). Nie jest jasne czy produkcja aerozolu proporcjonalna jest do  $U^2$  czy  $U^3$ . Wielkość produkcji nie jest pewna nawet co do rzędu.

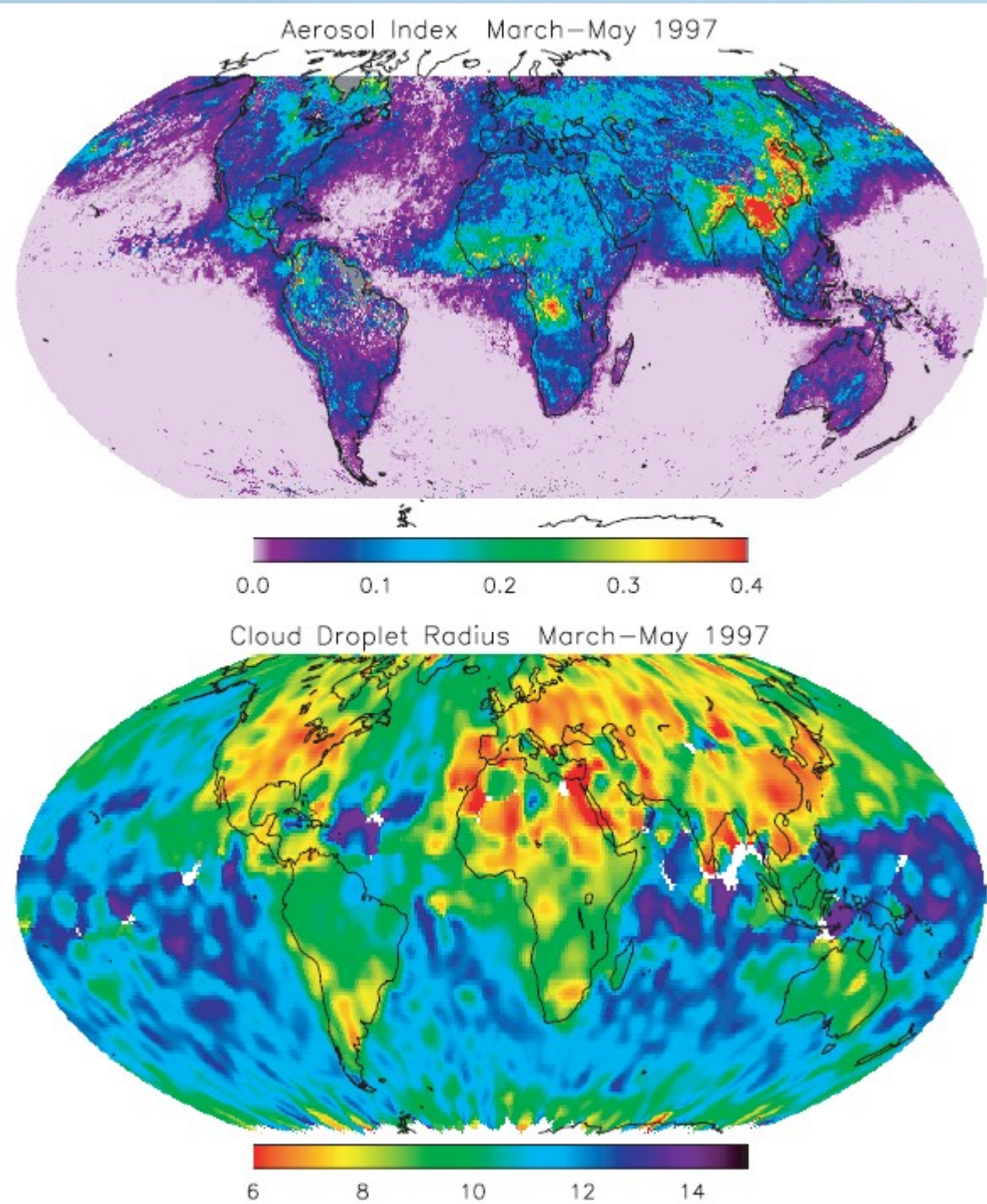
Aerozol arktyczny jest jednym z antropogenicznych czynników zmian klimatycznych. Dostarcza on do Arktyki cząstki węgla zwiększające albedo lodu. Arktyczna mgiełka wpływa na klimat Północy zmieniając oświetlenie, ogrzewając dolne warstwy atmosfery i prawdopodobnie wpływając na zachmurzenie Arktyki.



*Koncentracja cząstek węgla w aerozolu arktycznym w Alert (Kanada), Law & Stohl 2007 (Science)*



# Pierwszy pośredni efekt aerozolu naprawdę istnieje



Indeks aerozolu (proporcjonalny do ilości drobnych cząstek aerozolu) oraz efektywny promień kropel w chmurach z danych radiometru satelitarnego POLDER mierzącego polaryzację radiacji.

Widoczne jest zmniejszenie efektywnego promienia w obszarach intensywnej produkcji aerozolu antropogenicznego.

*Breon, Tanre & Generoso 2002 (Science)*



# Bilans aerozolu

Globalny bilans aerozolu  
sporządzony z danych  
MODIS dla września 2000.

a) grubość optyczna  
drobnego (*fine*) aerozolu.

Obszary:

a i c – zanieczyszczenia  
przemysłowe;

b i d – pożary roślinności;

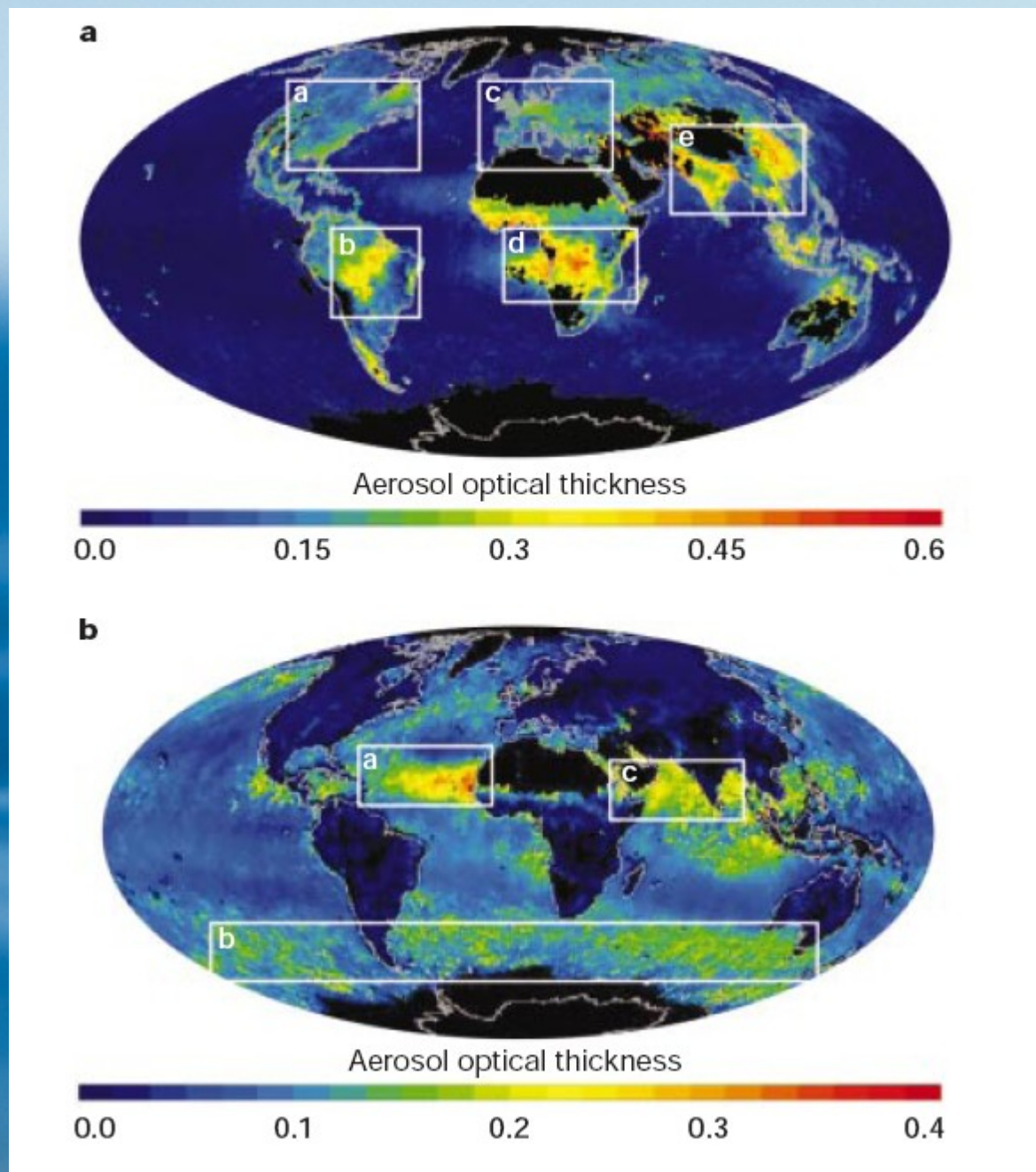
e - zanieczyszczenia  
antropogeniczne  
Południowej Azji

b) grubość optyczna  
grubego (*coarse*) aerozolu  
( $>1\ \mu\text{m}$ ). Obszar

a - pył saharyjski,

b – sól morską,

c – pył pustylny





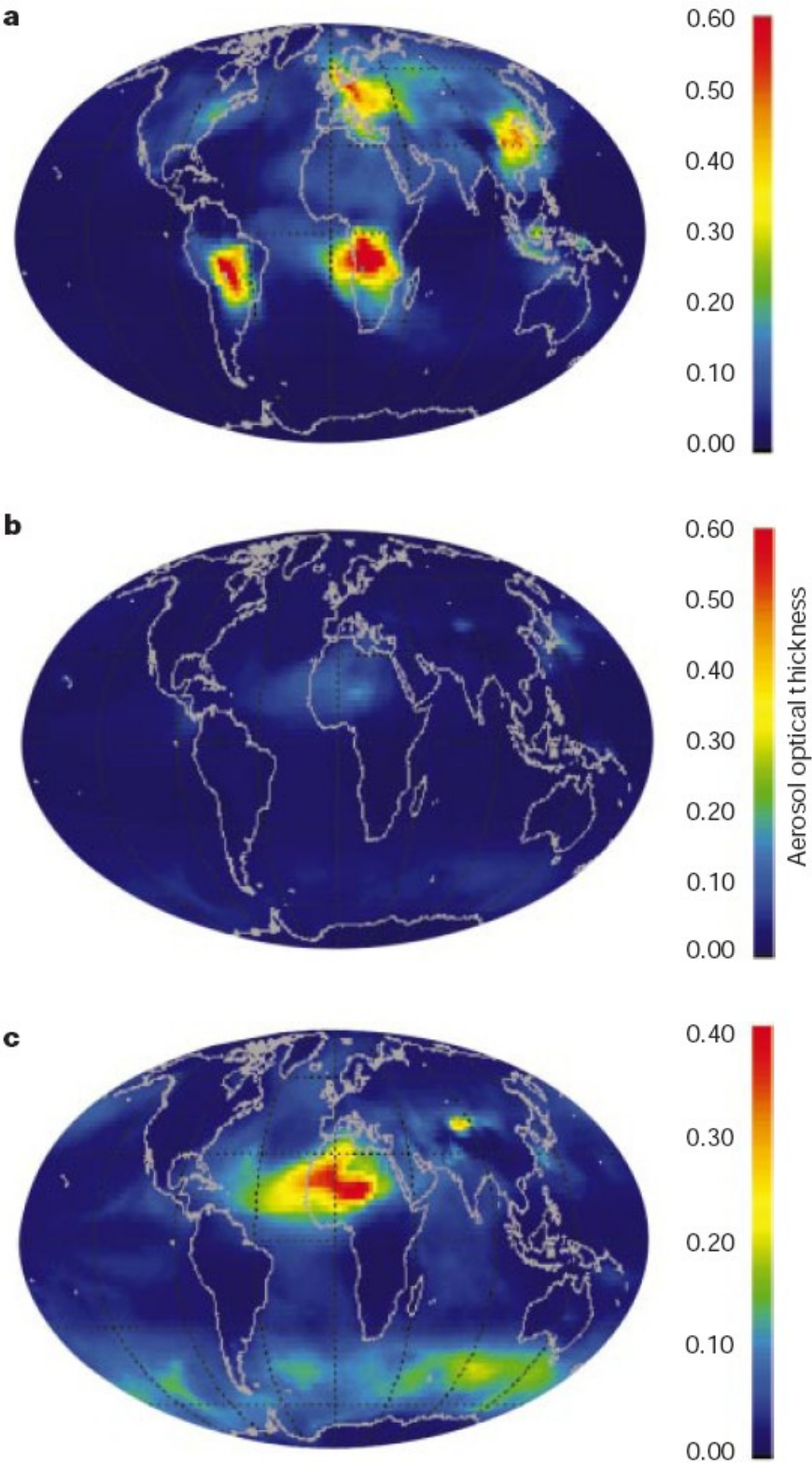
## Wyniki modelowania

Model przenoszenia aerozolu (za Chin i inni 2002) daje wyniki porównywalne do MODIS dla tego samego miesiąca:

a) drobny aerozol antropogeniczny

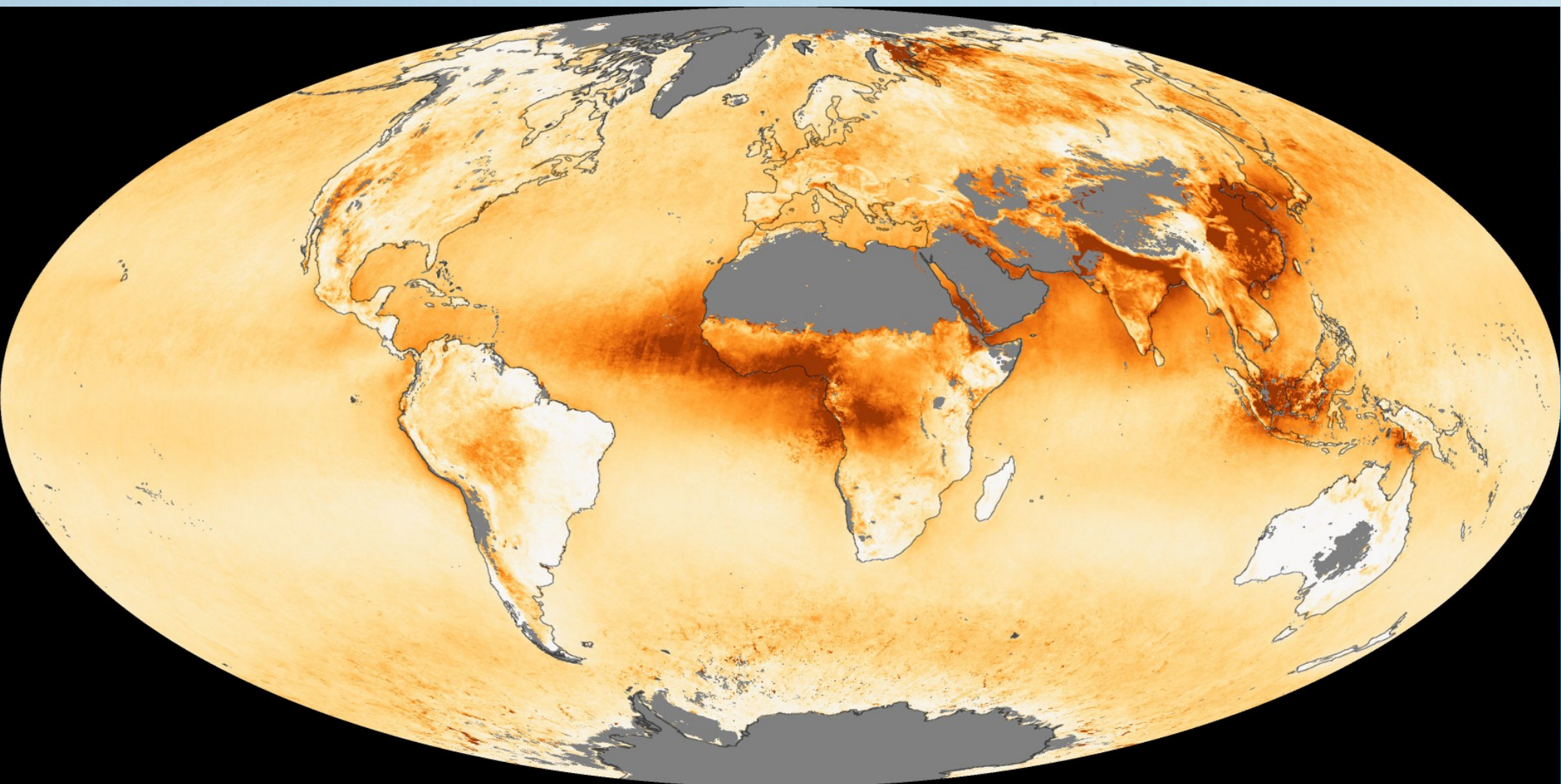
b) naturalny drobny aerozol

c) naturalny aerozol “gruby” (pył i sól morską)





# Grubość optyczna aerozolu w 2006 roku

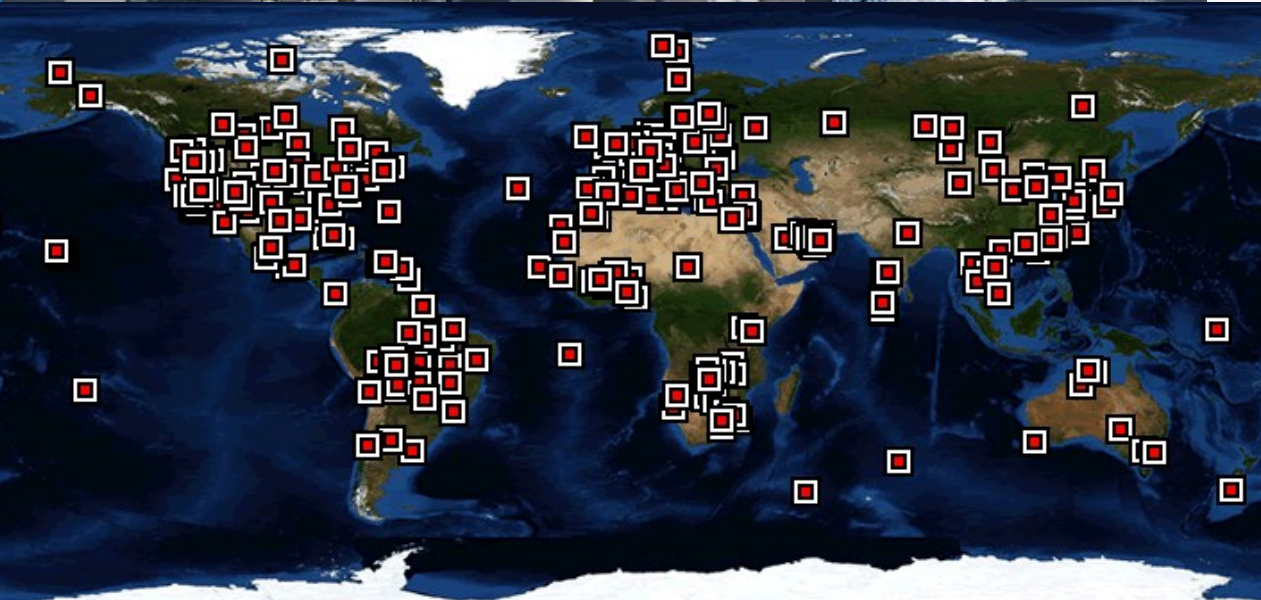
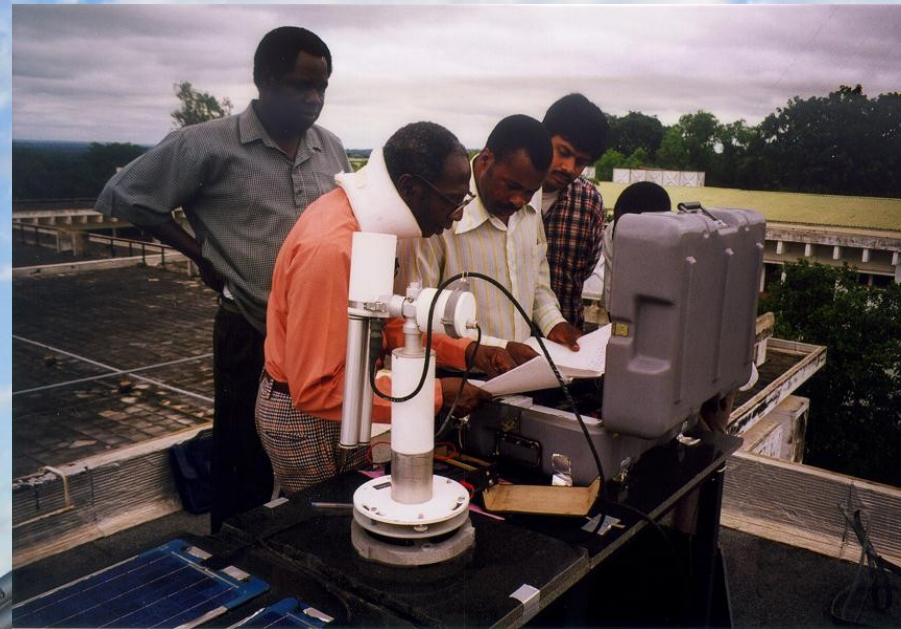


Obszary szare są częściami kontynentów zbyt jasnymi aby prawidłowo obliczyć grubość optyczną aerozolu.



# AERONET: światowa sieć pomiarów AOT

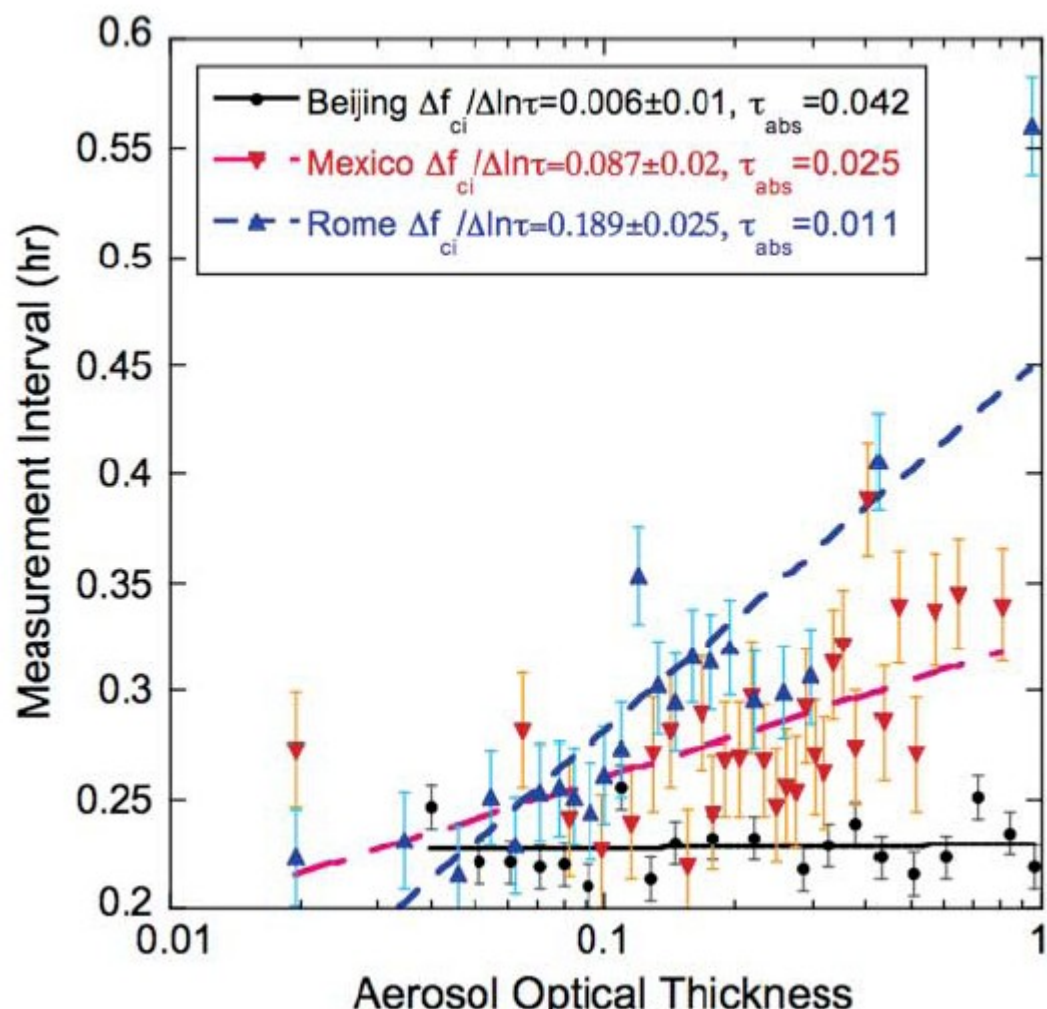
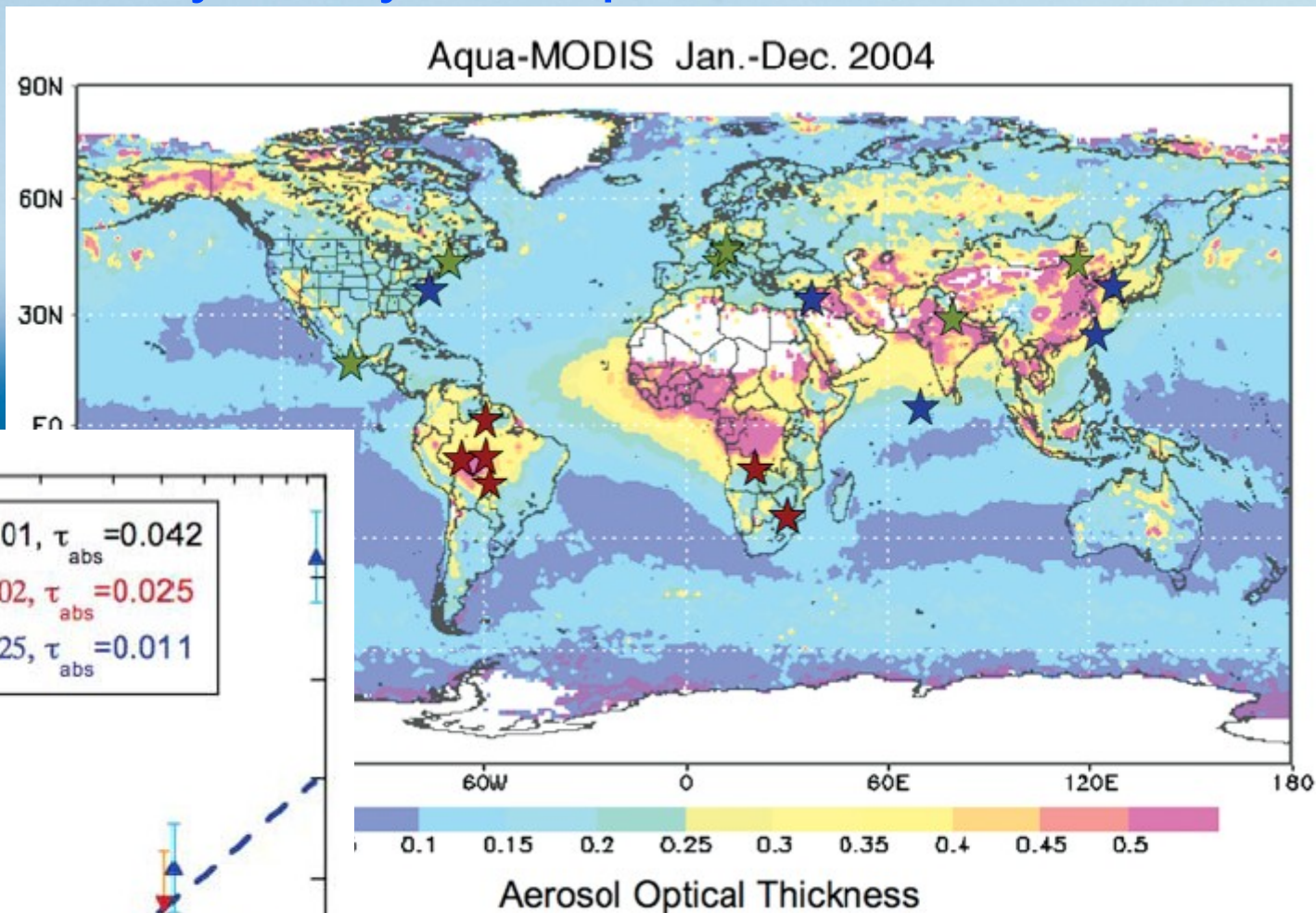
AERONET: sieć automatycznych radiometrów Cimel do mierzenia grubości optycznej atmosfery (AOT) zarządzana przez NASA. Dane wysyłane są automatycznie przez satelitę do NASA. Stacja w Sopocie istniała w latach 1997-2002 ("site manager": Tymon Zieliński)





# Aerozol chmury: który efekt przeważa?

Analiza danych z sieci AERONET wykazuje, że im większa absorpcja aerozolu na danym terenie tym mniej wzrasta ilość chmur z wzrostem AOT.



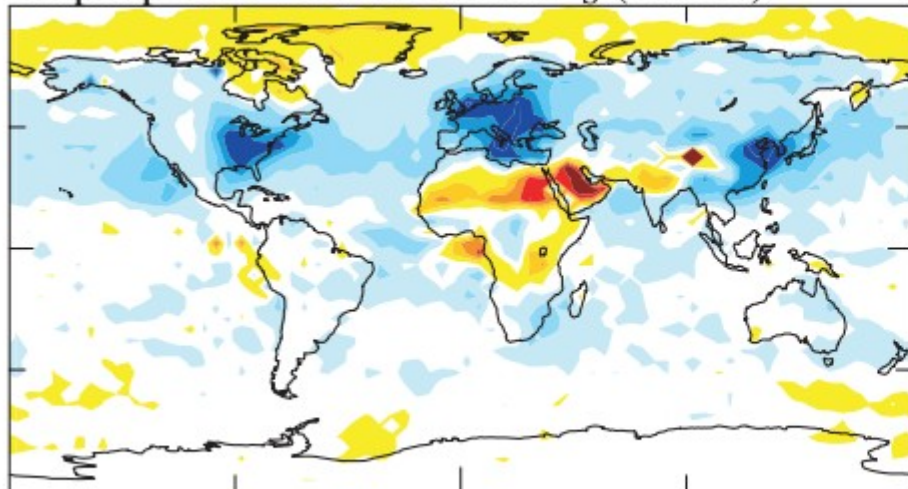
Wynik: globalnie aerozol antropogeniczny powoduje wzrost zachmurzenia o 5%. Zatem “efekt pół-bezpośredni” jest słabszy od “drugiego pośredniego”.

*Kaufman & Koren 2006 (Science)*

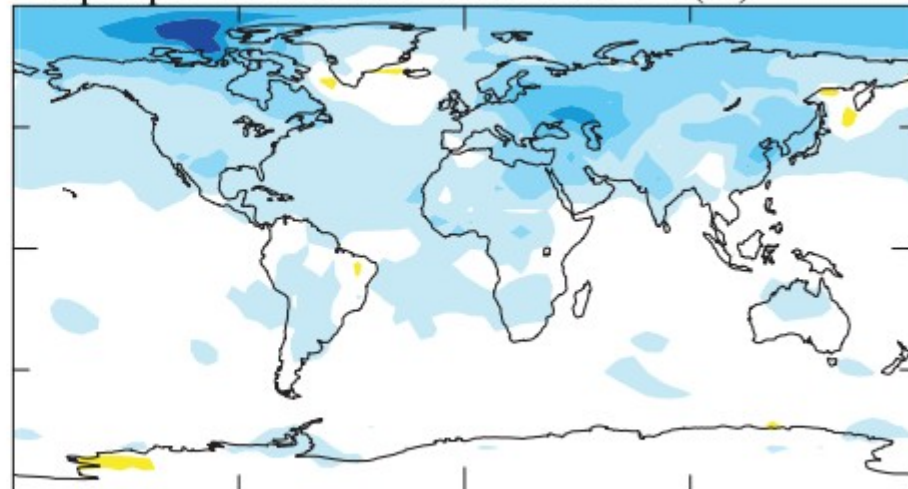


# Bezpośredni i pośredni efekt aerozolu

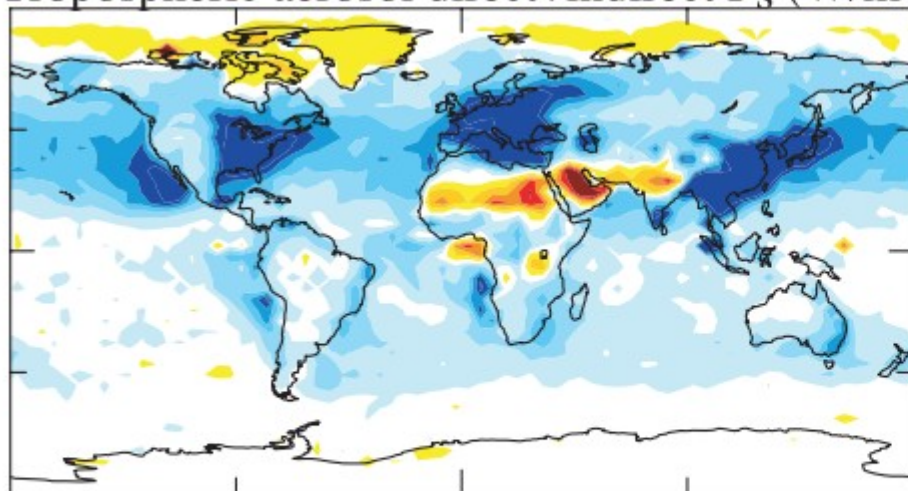
Tropospheric aerosol direct  $F_s$  ( $W/m^2$ )



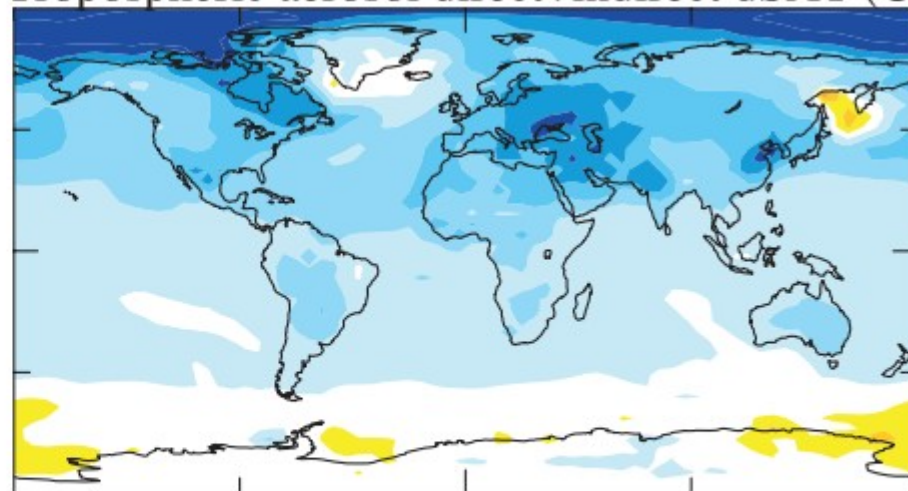
Tropospheric aerosol direct dSAT (C)



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



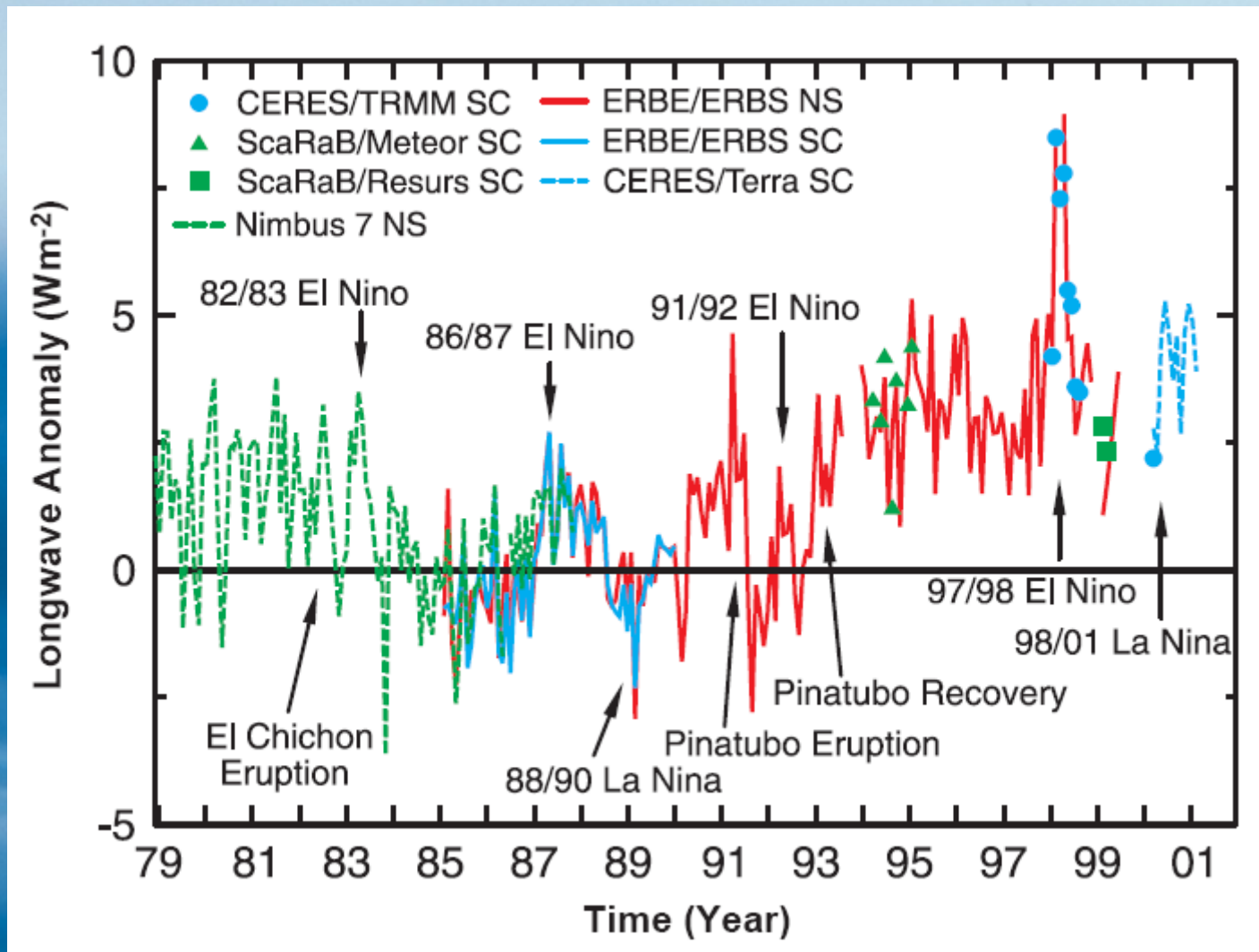
Tropospheric aerosol direct+indirect dSAT (C)



Wymuszenie radiacyjne na szczycie atmosfery związane z bezpośrednim i pośrednim efektem aerozolu oraz odpowiadające mu zmiany temperatury powierzchniowej wyliczone modelem GISS.

*Shindell et al. 2007 (JGR)*

# Czy albedo Ziemi jest stałe?

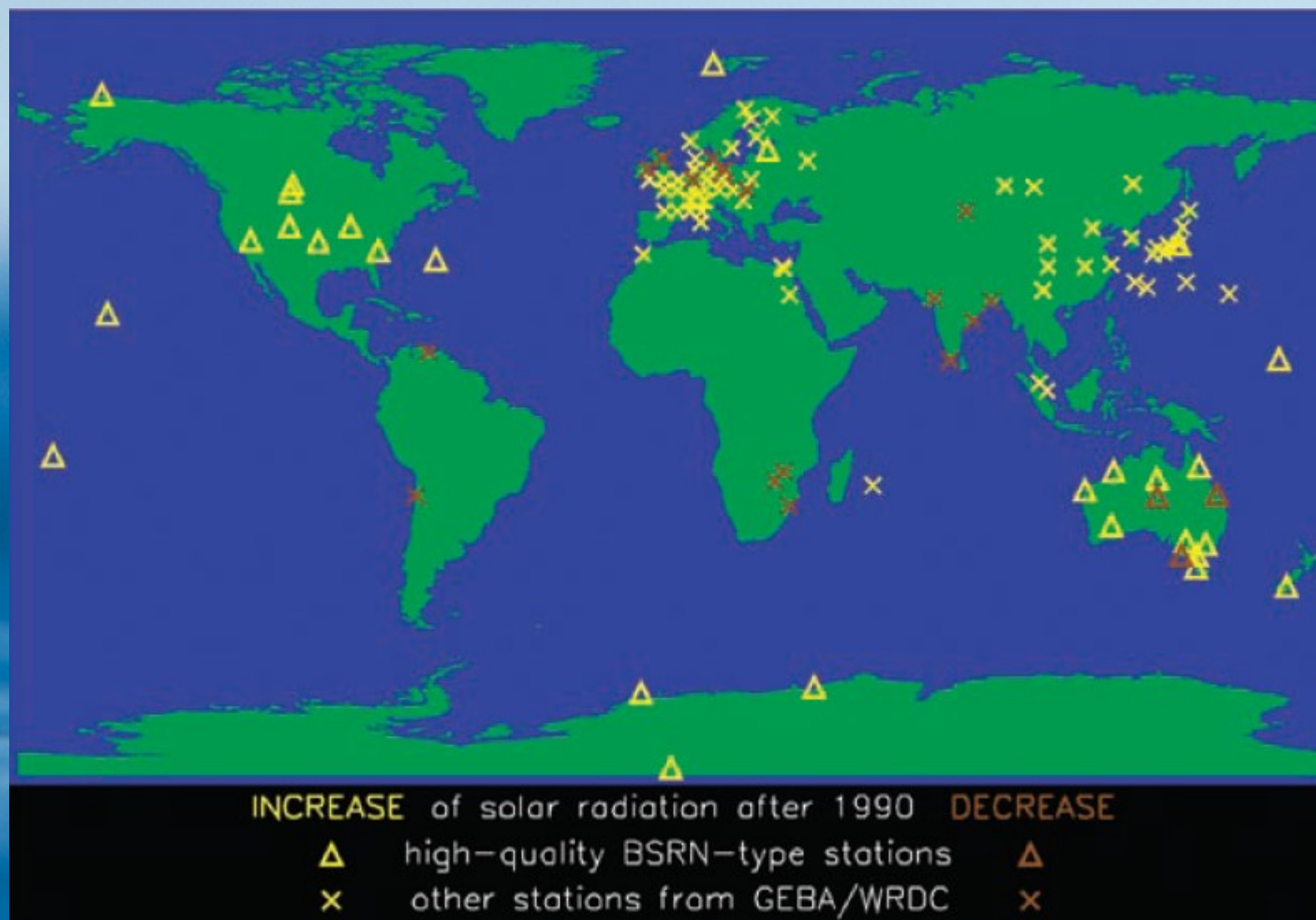


W roku 2002 pomimo wątpliwości związanych z wzajemną kalibracją różnych satelitarnych radiometrów zaczęto zauważać, że albedo Ziemi zmienia się w czasie pod wpływem wulkanów, El Niño. Czy istnieje jednak trend długookresowy?

*Wielicki et al. 2002 (Science)*



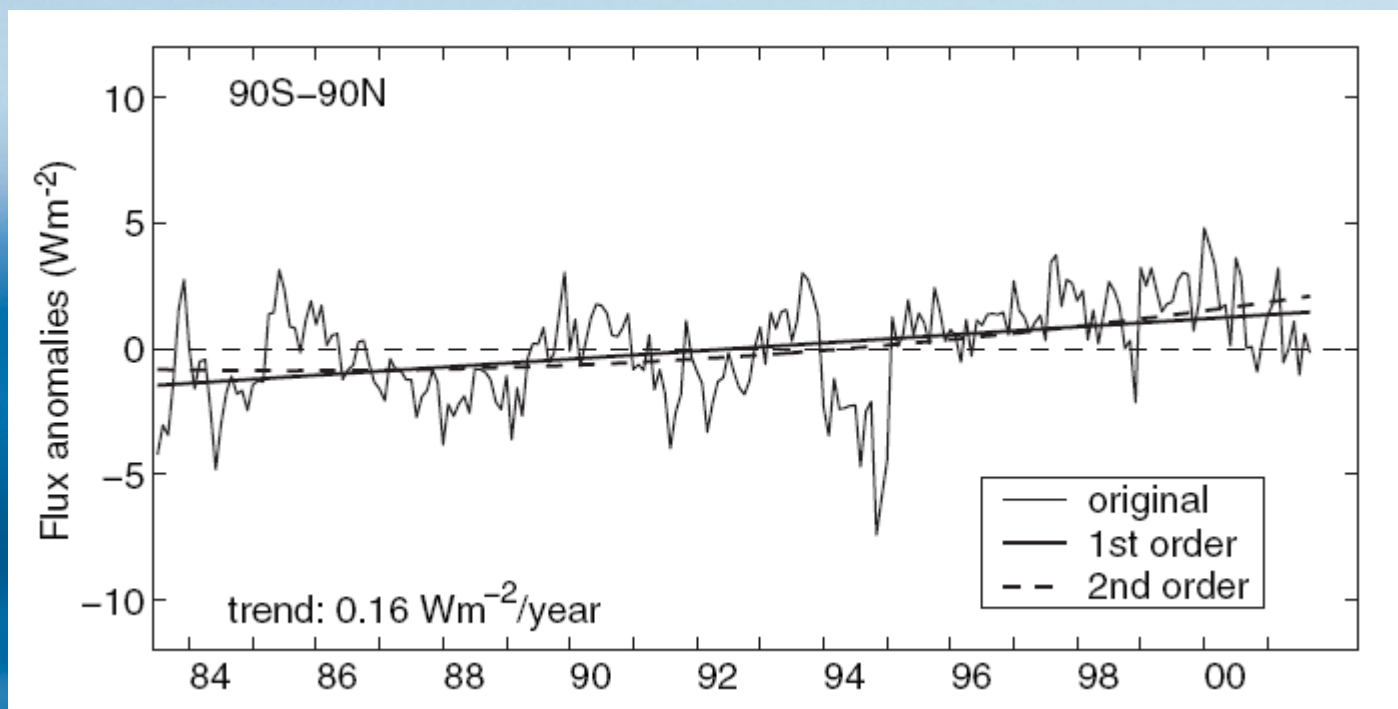
# Ziemia (prawie cała) rozjaśnia się



Większość stacji pomiarowych na powierzchni Ziemi notują **zwiększone** oświetlenie (mniejszą grubość aerozolu) od roku 1990. Jedynie stacje w tropikach na subkontynencie Indyjskim, Afryce i Ameryce Południowej pokazują konsekwentne **zmniejszenie** oświetlenia.

*Wild et al. 2005 (Science)*

# Wyniki satelitarne potwierdzają pojaśnienie

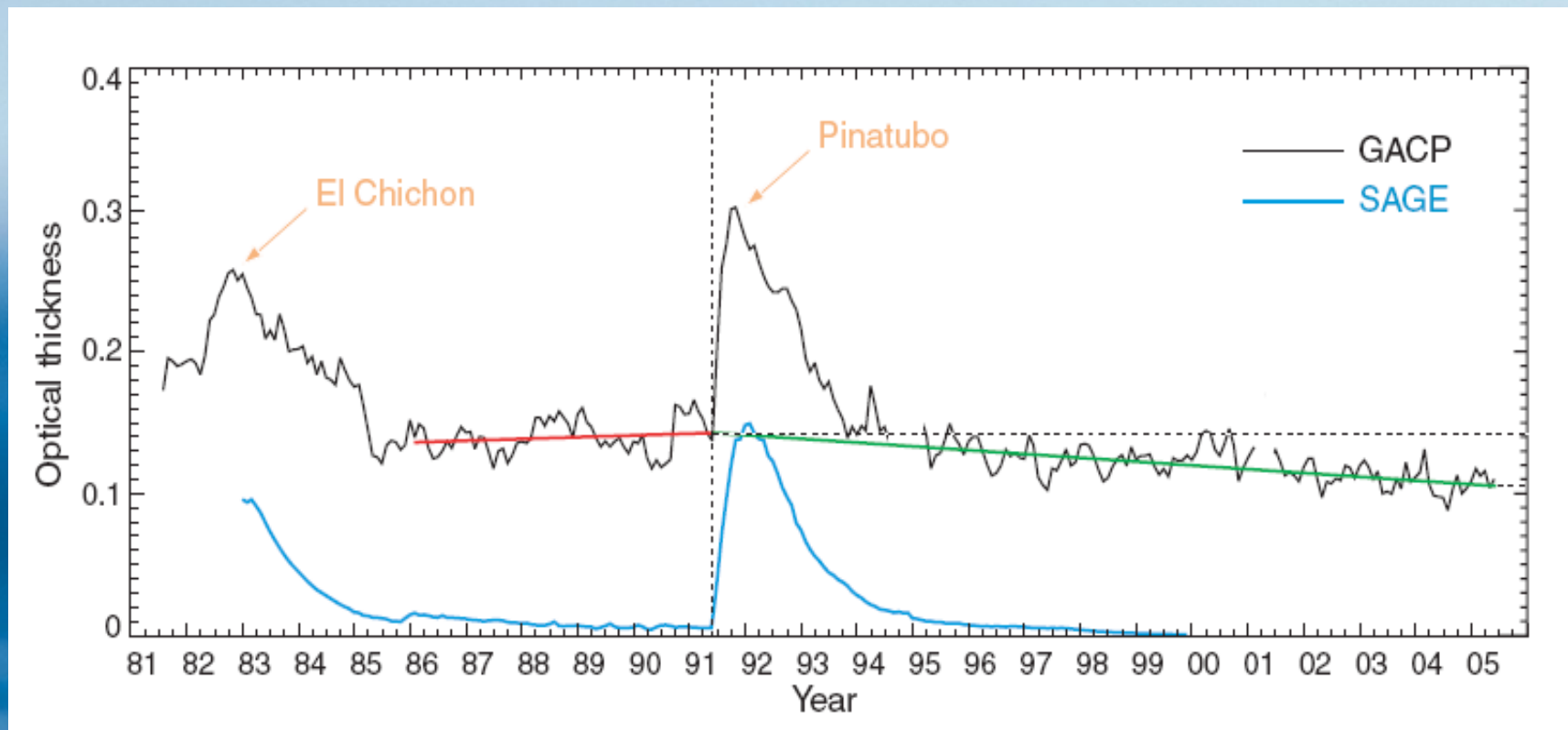


Najdłuższy zapis satelitarny (od 1983 r.) potwierdza pojaśnienie Ziemi. Trend liniowy jest rosnący w całym przedziale 1983-2001 ale dopasowanie funkcją drugiego stopnia pokazuje, że wzrost zaczął się ok. 1990 roku.

Prawdopodobny powód: upadek ciężkiego przemysłu w byłym bloku radzieckim.



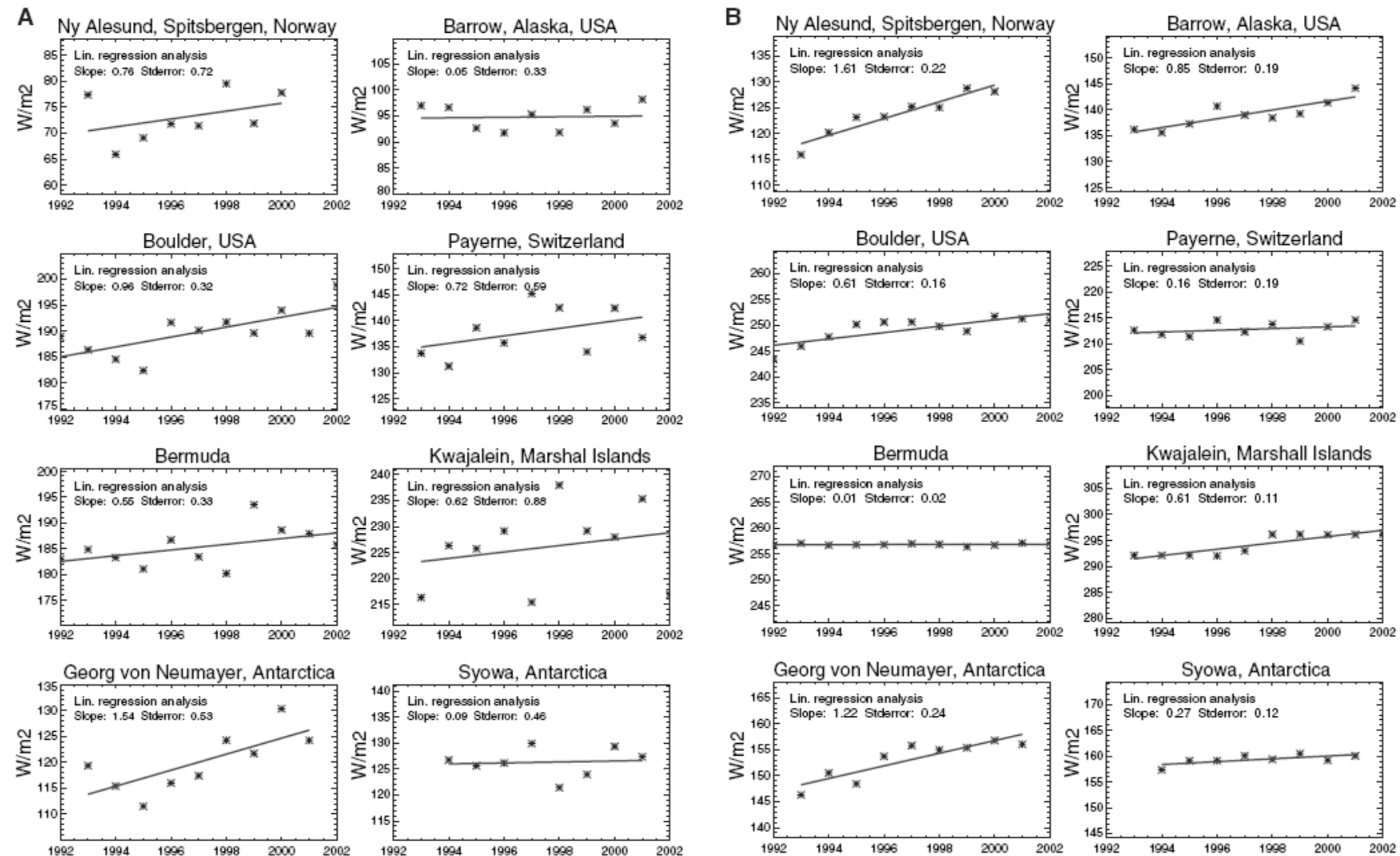
# Mechanizm wyjaśnienia Ziemi: mniej aerozolu



Najdłuższy pomiar grubości optycznej atmosfery (AOT) z satelity, Global Aerosol Climatology Project (GACP), wskazuje na trend malejący od opadnięcia pyłu wulkanu Pinatubo (1991-1993). Trend między wulkanami El Chicon a Pinaubo nie wykazywał zauważalnych zmian. Dla porównania wyniki grubości optycznej aerozolu stratosferycznego Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE). Z różnicy wartości wynika, że większość trendu malejącego to aerozol troposferyczny.

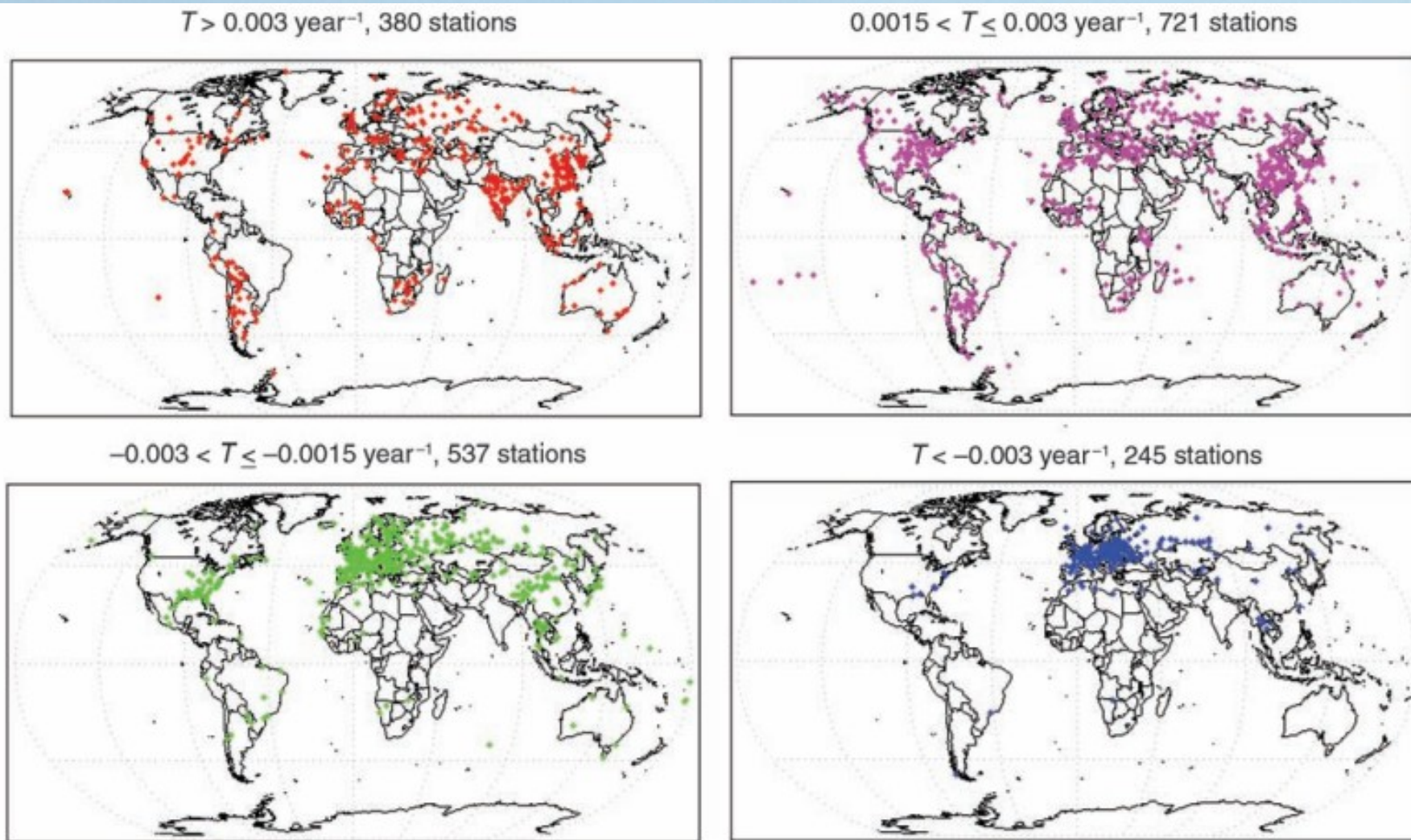
*Mishchenko et al. 2007 (Science)*

# Trend “pojaśnienia” dotyczy większości półkuli północnej





## Ziemia (prawie cała) rozjaśnia się, c.d.



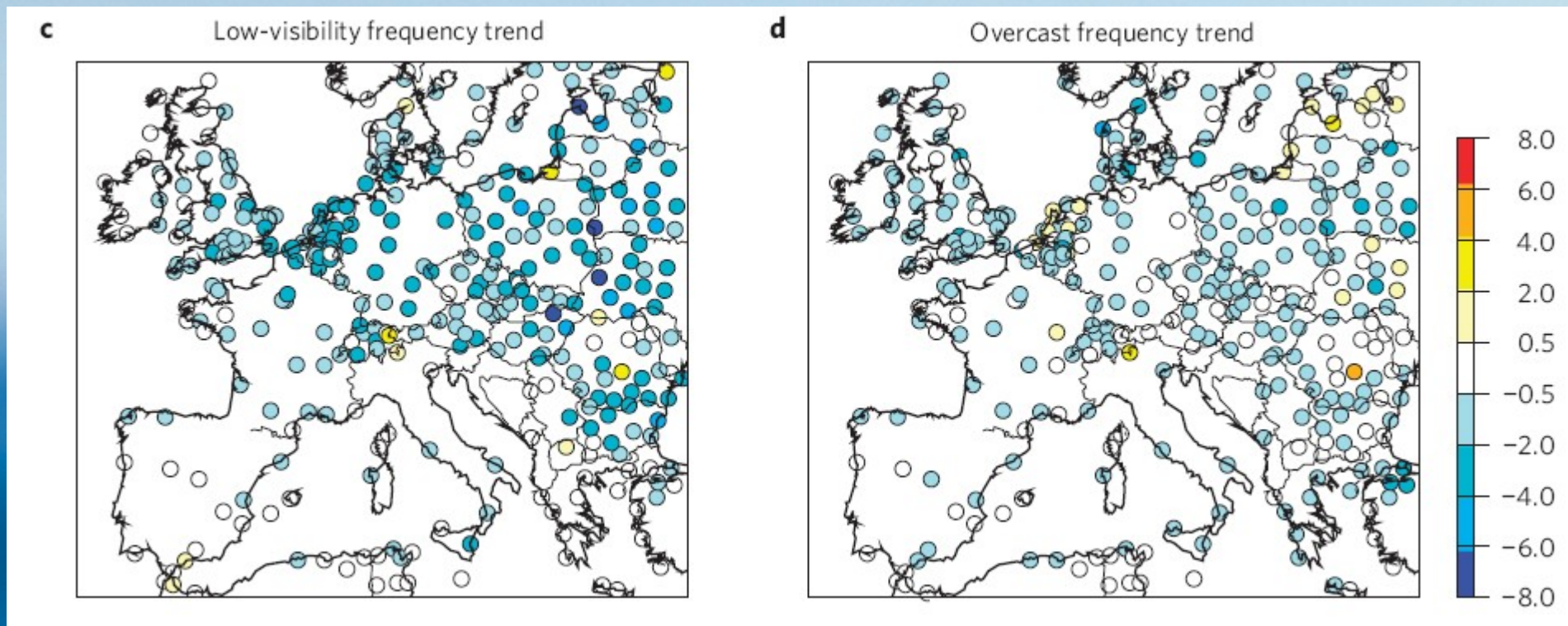
**Fig. 2.** Locations of the ~58% of the 3250 stations where the magnitude of Vil AOD changed (linear trend,  $T$ ) by more than  $0.0015 \text{ year}^{-1}$  from 1973 to 2007.

Podział stacji pomiarowych dla których w okresie 1973 do 2006 wystąpiło zwiększenie grubości optycznej (**czerwone**) oraz coraz wyraźniejsze zmniejszenie (kolejno fioletowe, **zielone** i **niebieskie**). Okres ten obejmuje zarówno globalne “zaciemnienie” jak i “pojaśnienie”.

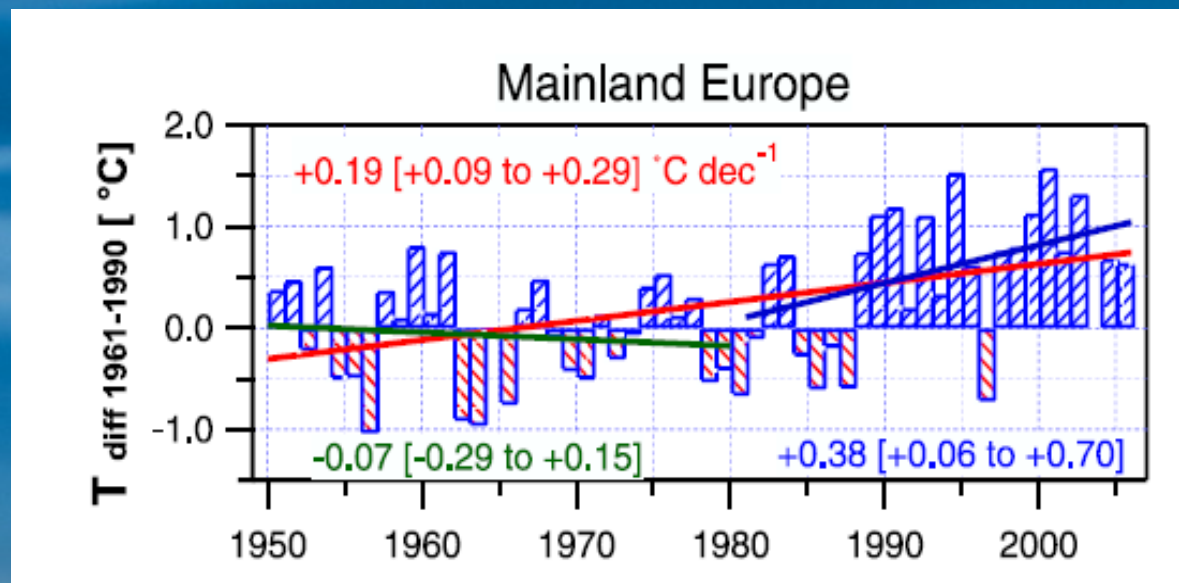
*Wang, Dickson & Liang 2009 (Science)*



# Aerozol i temperatura powierzchniowa Europy



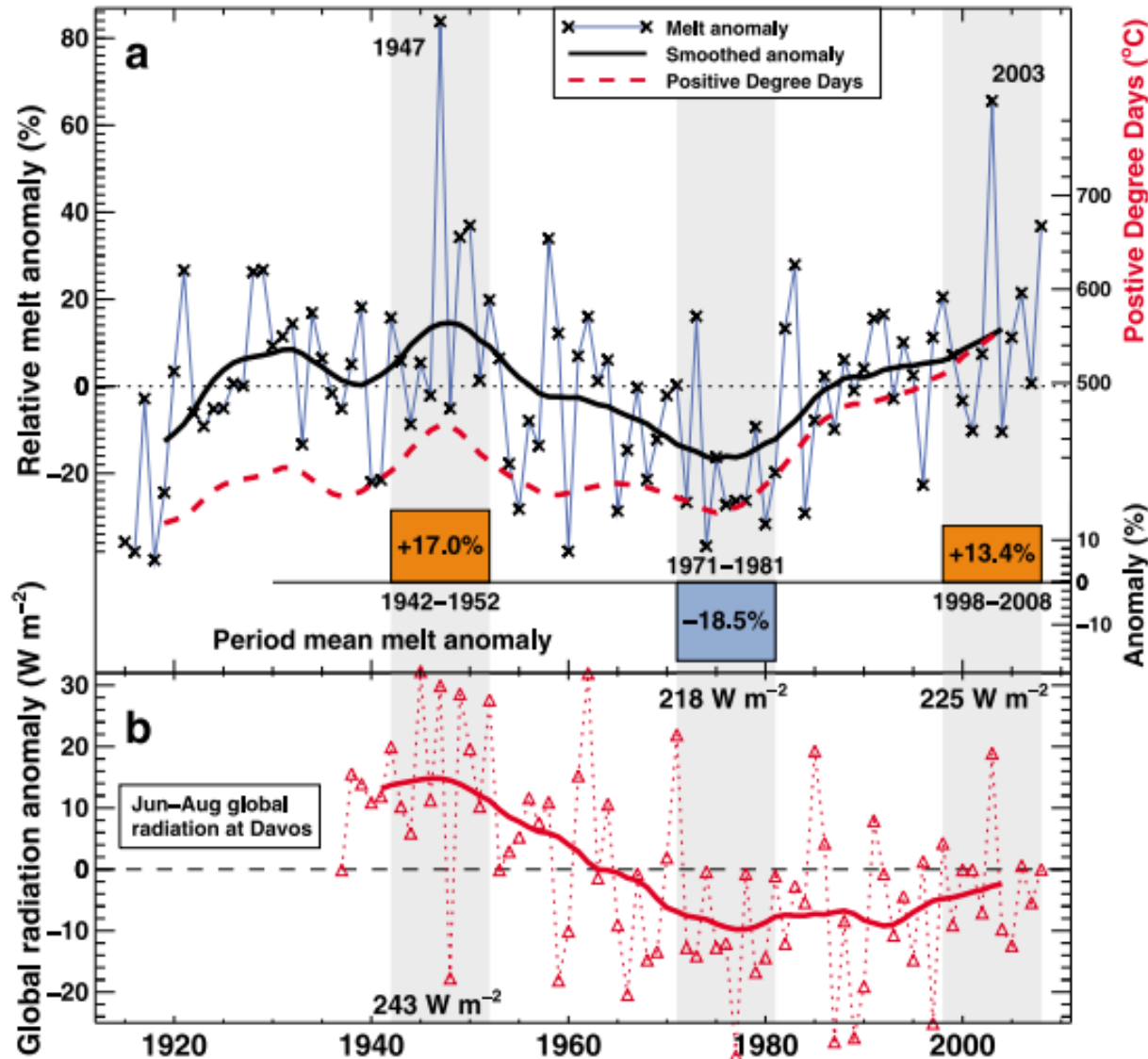
Zmiany w ilości mglistych i zachmurzonych dni w okresie jesieni i zimy (dni na dekadę) oraz trendy temperatury powierzchniowej Europy Środkowej. Jej wzrost prawie dwa razy szybszy niż średnia globalna w okresie od 1980 roku jest prawdopodobnie skutkiem lokalnego ubywania aerozolu.



*Vautard et al. 2009 (Nature Geoscience)*  
*Philipona et al. 2009 (GRL)*



# Skutki wcześniejszego pojaśnienia Europy Środkowej

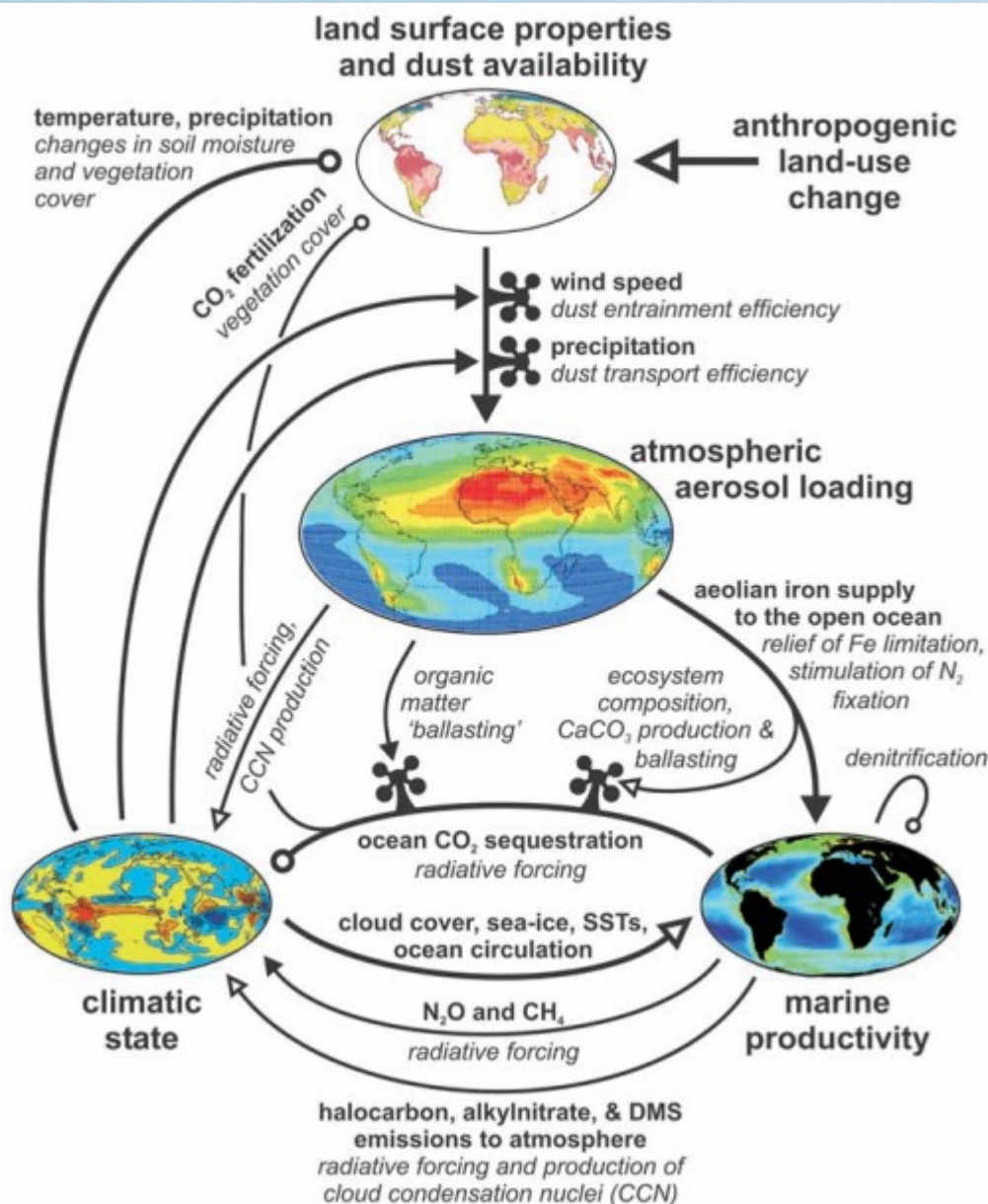


Wkrótce po II Wojnie Światowej wystąpił okres przyspieszonego topienia lodowców alpejskich (czarna krzywa na górnym panelu) nie dający się wytłumaczyć ilością dni z temperaturą dodatnią (czerwona przerywana).

Istnieje jednak czynnik dobrze korelujący się z tym przyspieszeniem topienia. Jest to zwiększone oświetlenie słoneczne latem (JJA) zmierzony przez pierwszą na świecie szwajcarską sieć piranometrów

Przyczyna pojaśnienia nieba nad Szwajcarią w latach czterdziestych? Najbardziej prawdopodobną hipotezą jest zniszczenie przemysłu Niemiec pod koniec wojny.

# Związki aerozolu z klimatem: nie jest to proste



Schemat powiązań między aerozolem a klimatem.

Zawiera on elementy geochemii i biologii, np. Wpływ pyłu zawierającego żelazo na produkcję pierwotną Oceanu Południowego (ale o tym w... nastpnym odcinku)



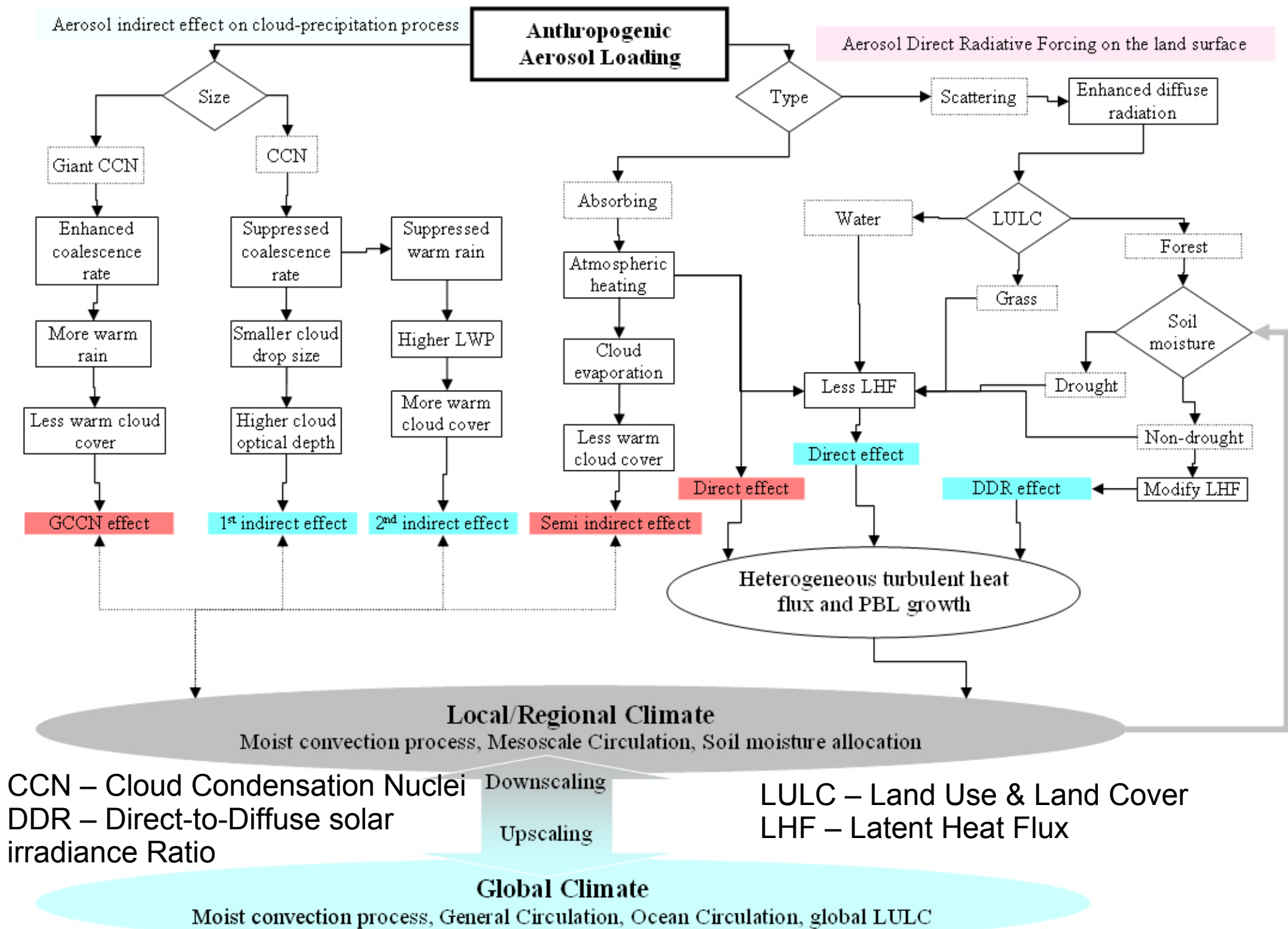
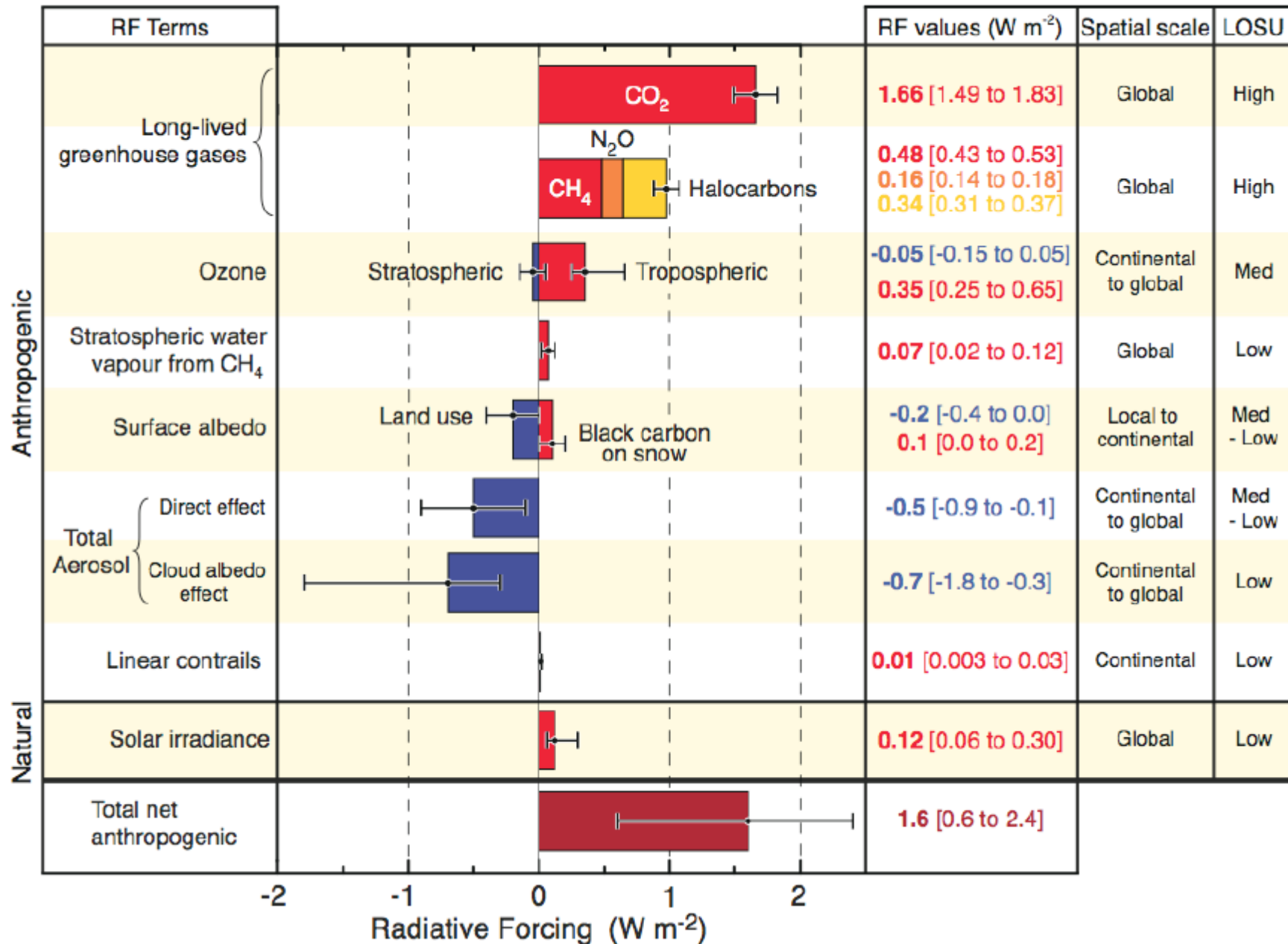


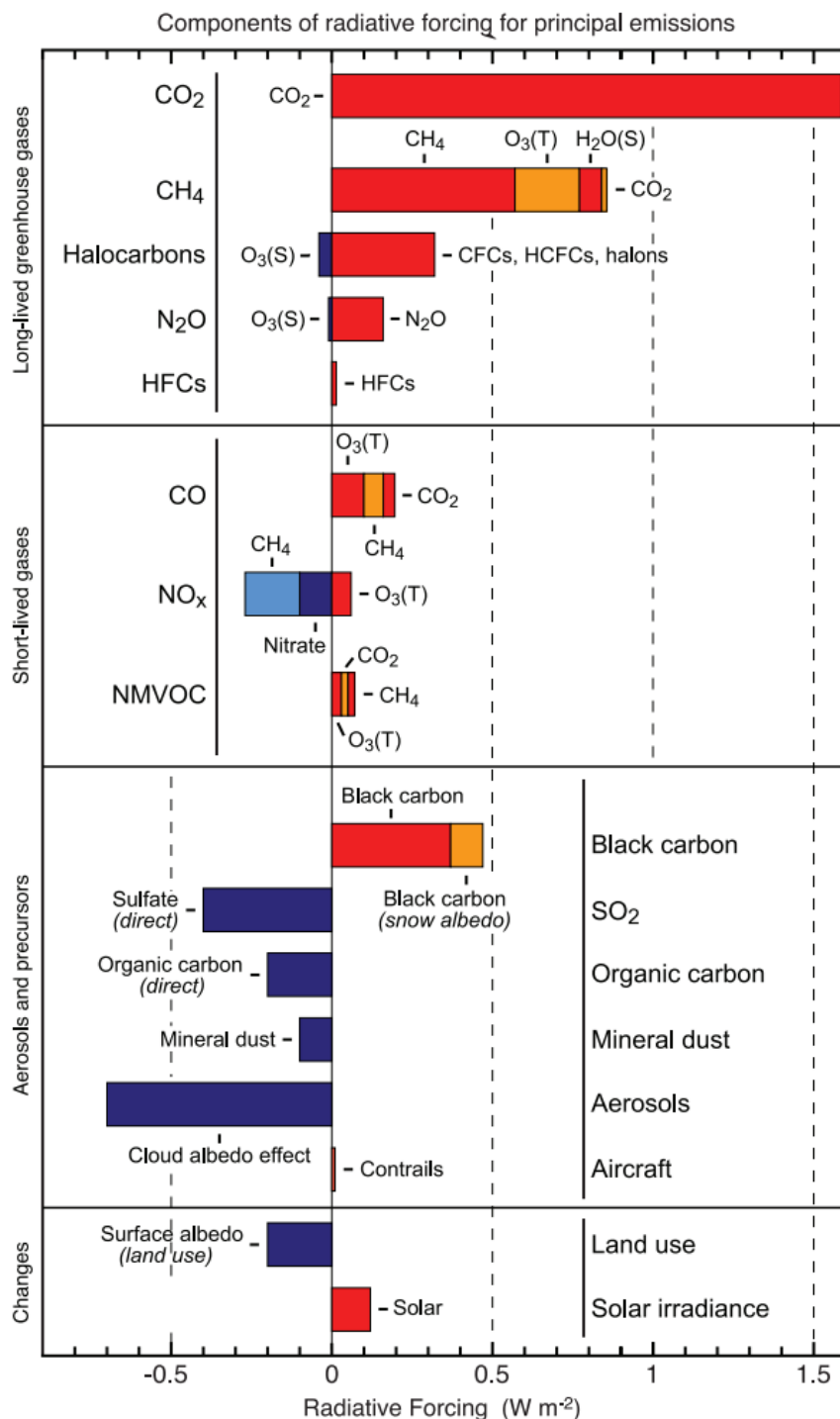
Figure. Hypothesis chart of the aerosol effect on the regional climate (by Toshihisa Matsui and Roger A. Pielke)

# Raport IPCC: stan wiedzy na rok 2007

## Radiative Forcing Components







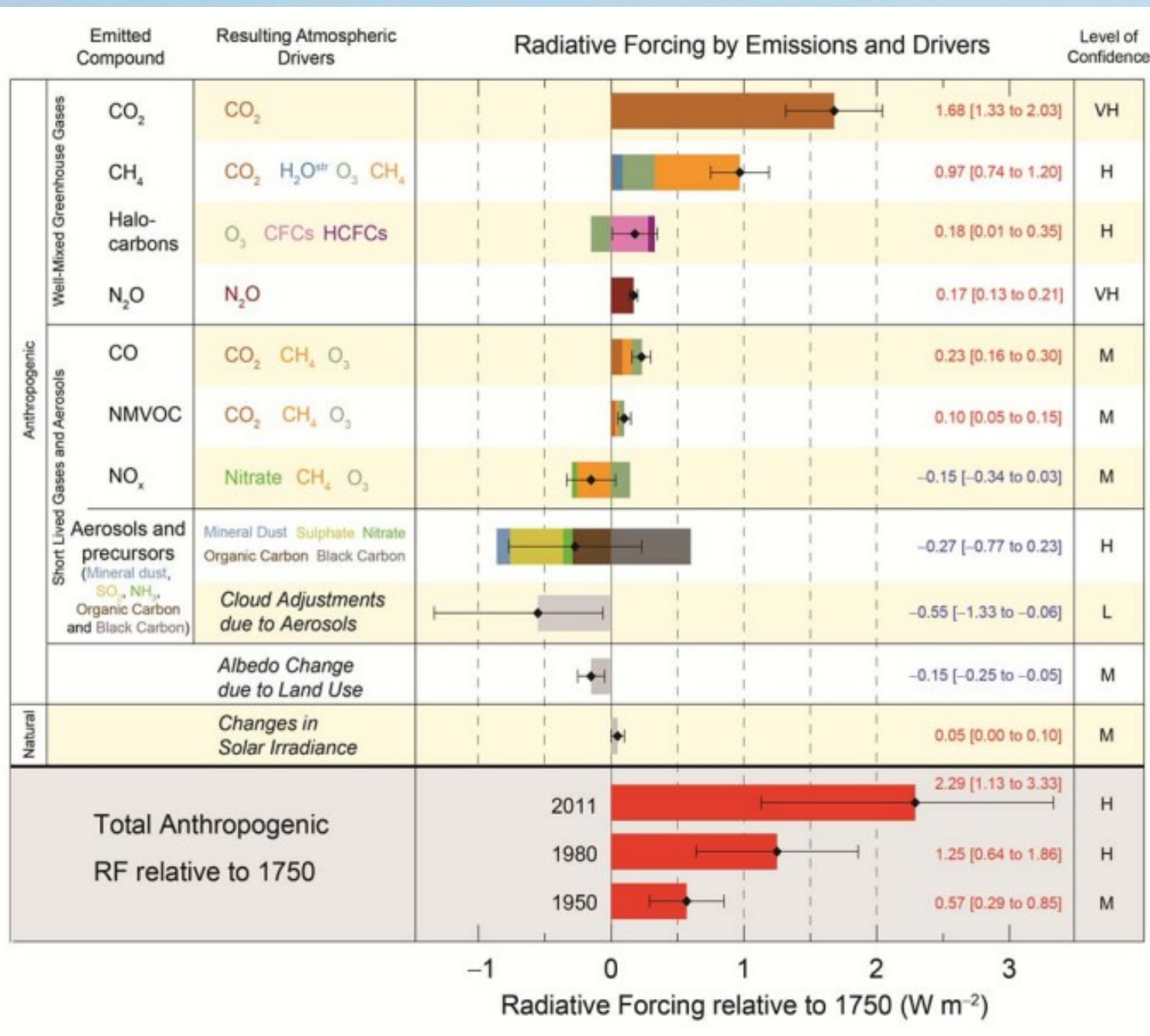
## IPCC 2007: antropogeniczne wymuszenie radiacyjne; dokładniejszy obraz

W przeciwieństwie do poprzedniego wykresu tu wymuszenia antropologiczne rozdzielono na poszczególne emisje.

Tutaj, sadza (*black carbon*) jest wyraźnie pokazana jako osobny element. Ale czy to ostatnie słowo?

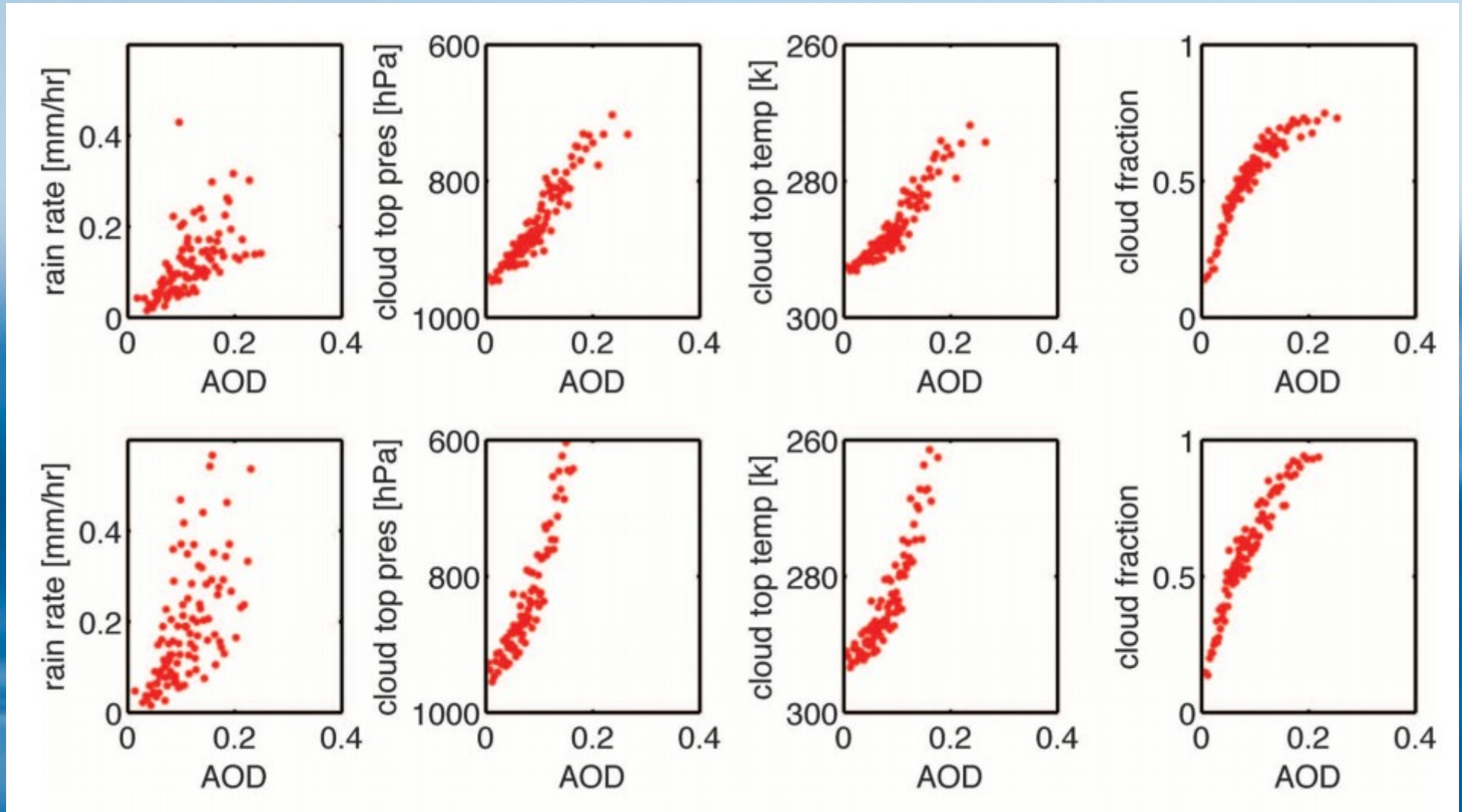
**Figure 2.21.** Components of RF for emissions of principal gases, aerosols and aerosol precursors and other changes. Values represent RF in 2005 due to emissions and changes since 1750. (S) and (T) next to gas species represent stratospheric and tropospheric changes, respectively. The uncertainties are given in the footnotes to Table 2.13. Quantitative values are displayed in Table 2.13.

# Raport IPCC: stan wiedzy na rok 2013





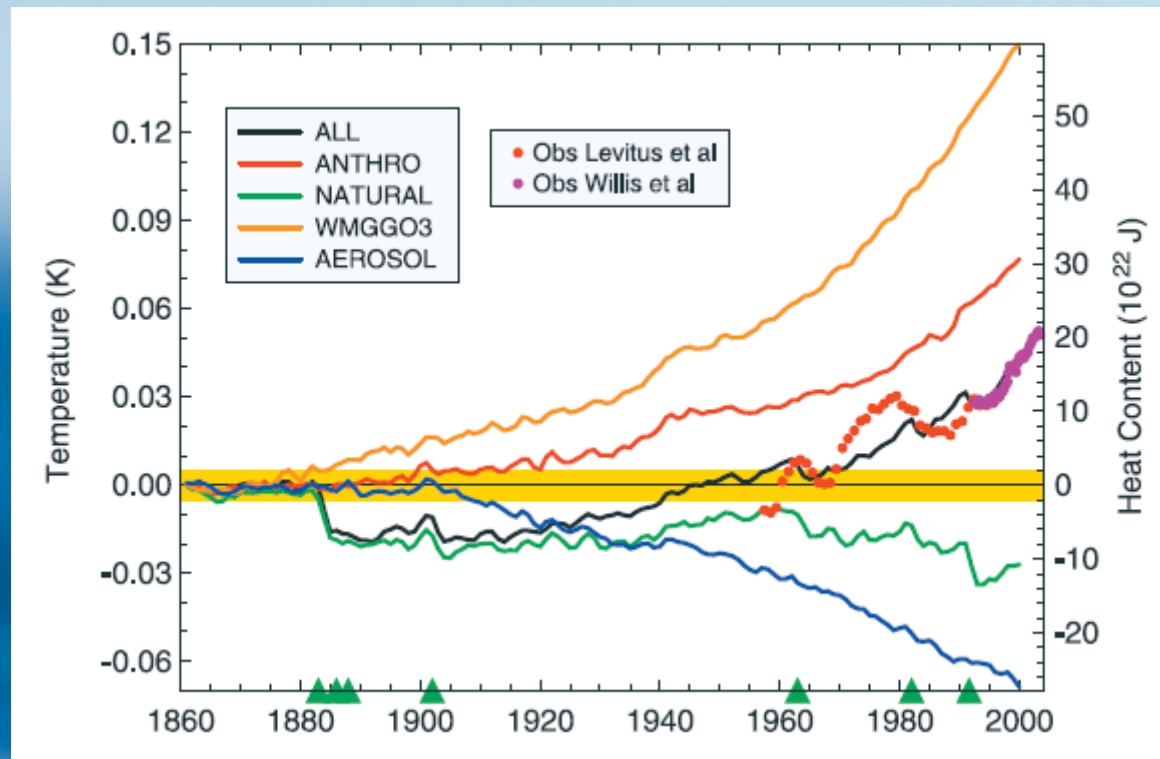
# Efekt aerozolu na chmury najłatwiej zauważyć w czystej atmosferze



Większość efektu aerozolu na chmury zachodzi pomiędzy czystą a lekko “zaareolozowaną” atmosferą. Widoczne jest to dla wszystkich danych oceanicznych (góra) oraz warunków sprzyjających konwekcji (niskie ciśnienia – dół). Wynika stąd, że duża część niepewności w wymuszeniu aerozolowym wynika z nieznanomości stanu atmosfery w 1750 roku (patrz też Carslaw et al 2013).

*Koren, Dagan & Altaratz 2014 (Science)*

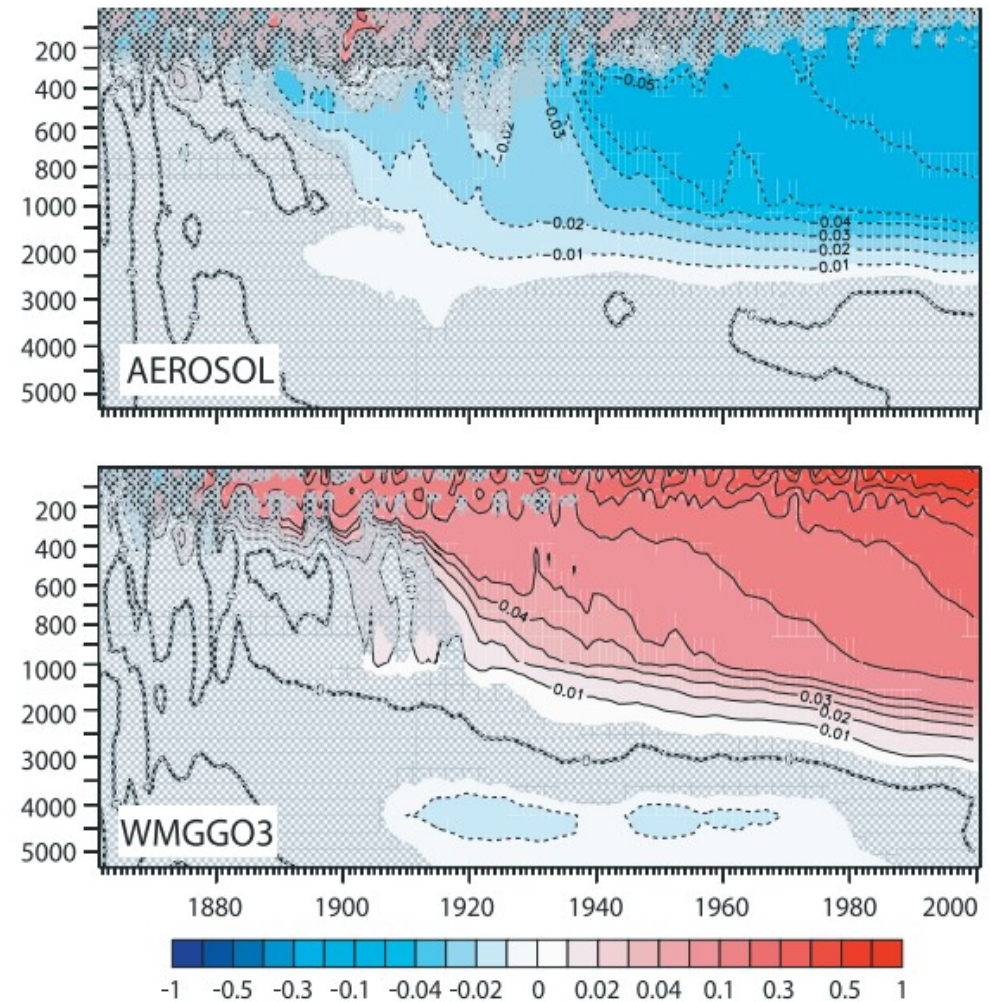
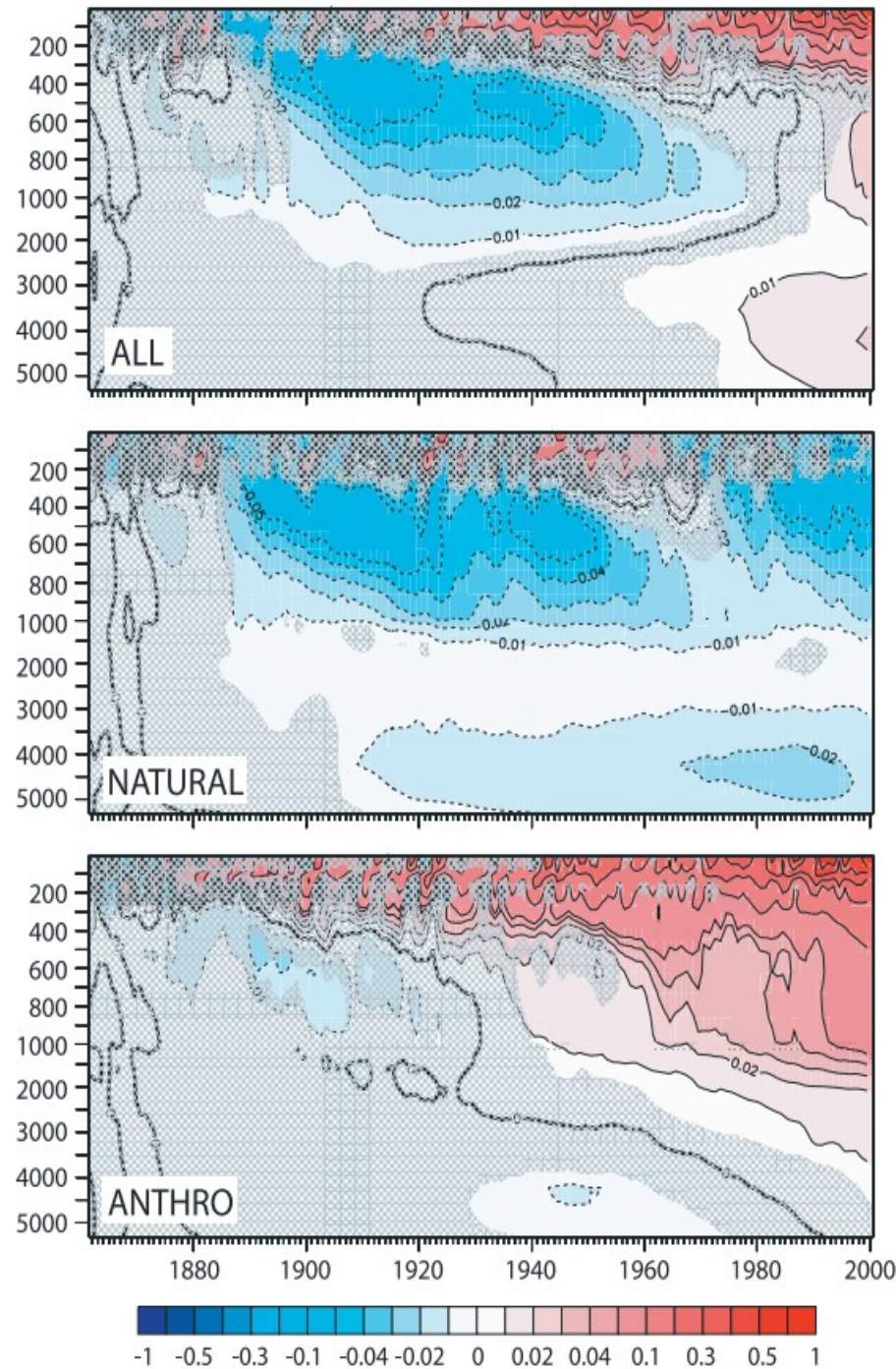
Without anthropogenic aerosol, ocean would absorb twice the amount of heat in the 20<sup>th</sup> century?



Average ocean temperature anomaly (0-3000 m) from observation (red and violet dots) and calculated from the GFDL CM2 model using all known forcings (ALL), z anthropogenic (ANTHRO), natural: solar constant and volcanoes inc. Krakatau 1883, Agung 1963, El Chichon 1982 & Pinatubo 1991 (NATURAL) – well mixed greenhouse gases & ozone (WMGGO3) and anthropogenic aerosol (AEROSOL).

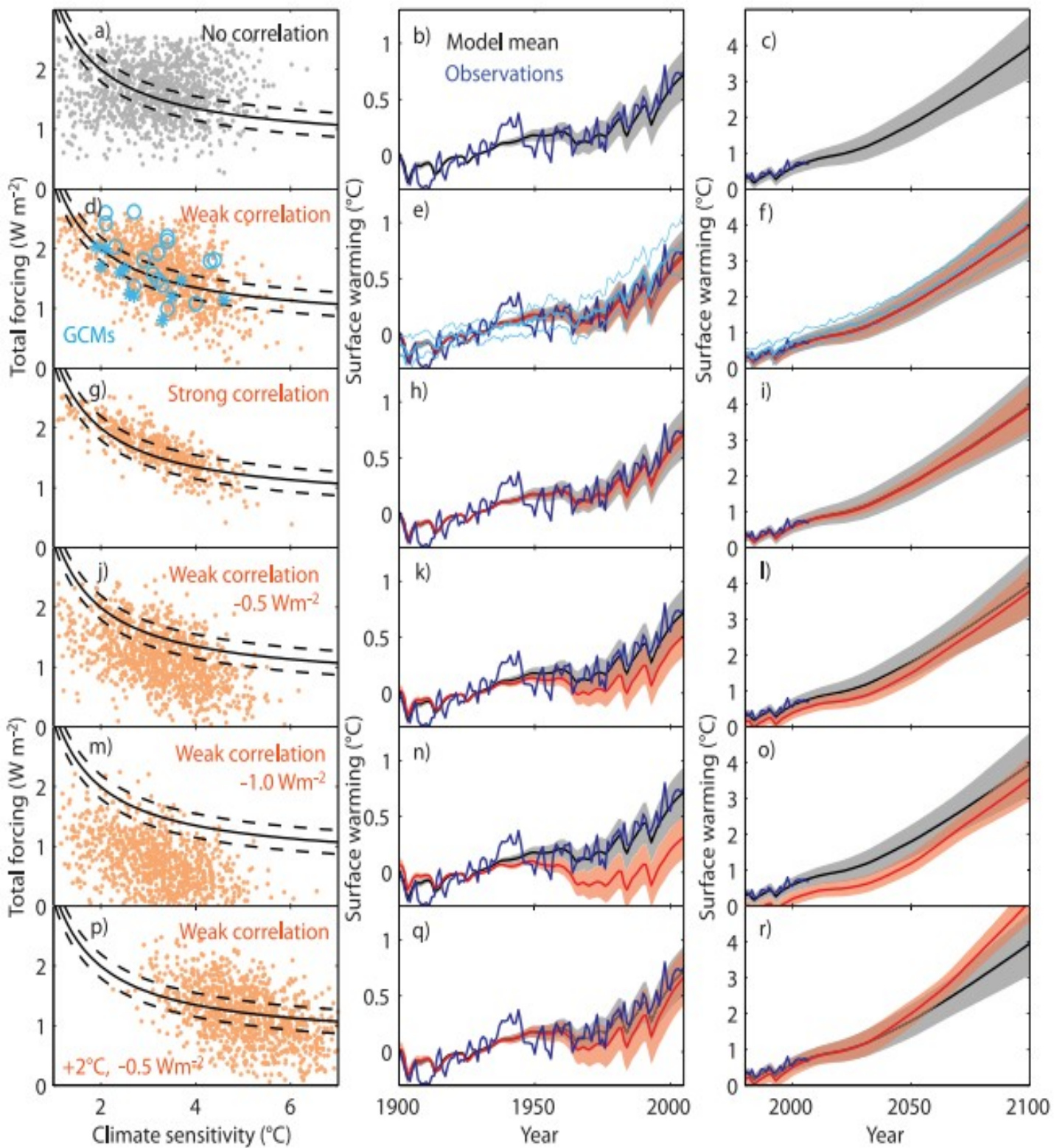


# Aerosol needed to explain observed ocean warming



Ocean temperature in standard deviations of natural (modeled) variability for forcings: all, natural, anthropogenic, aerosol and well mixed greenhouse gases + O<sub>3</sub>.

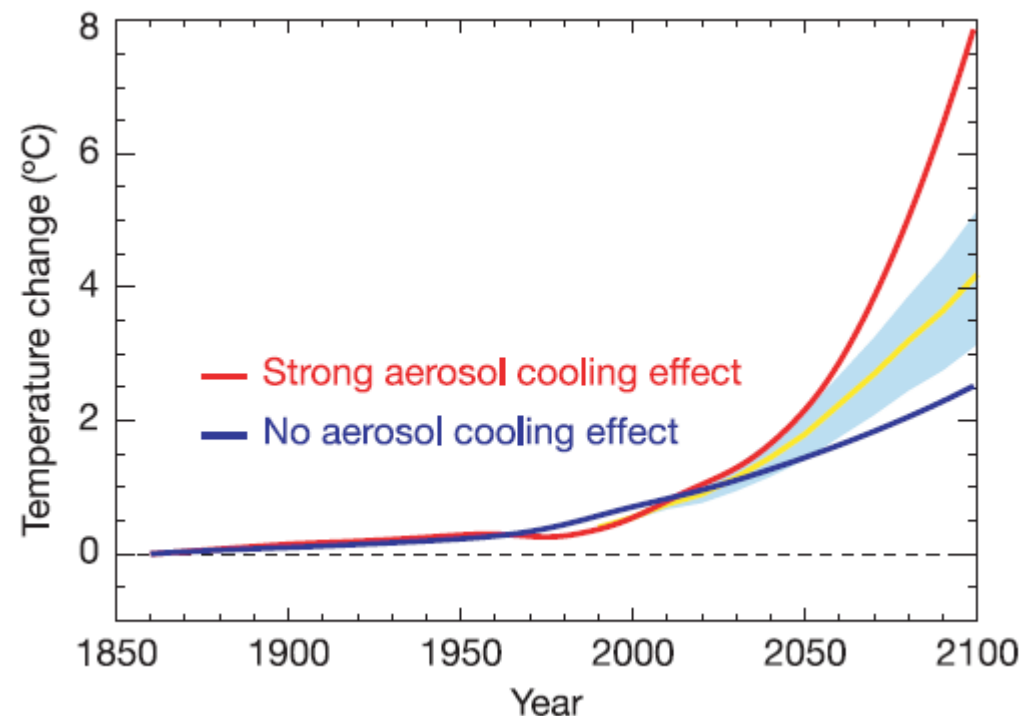
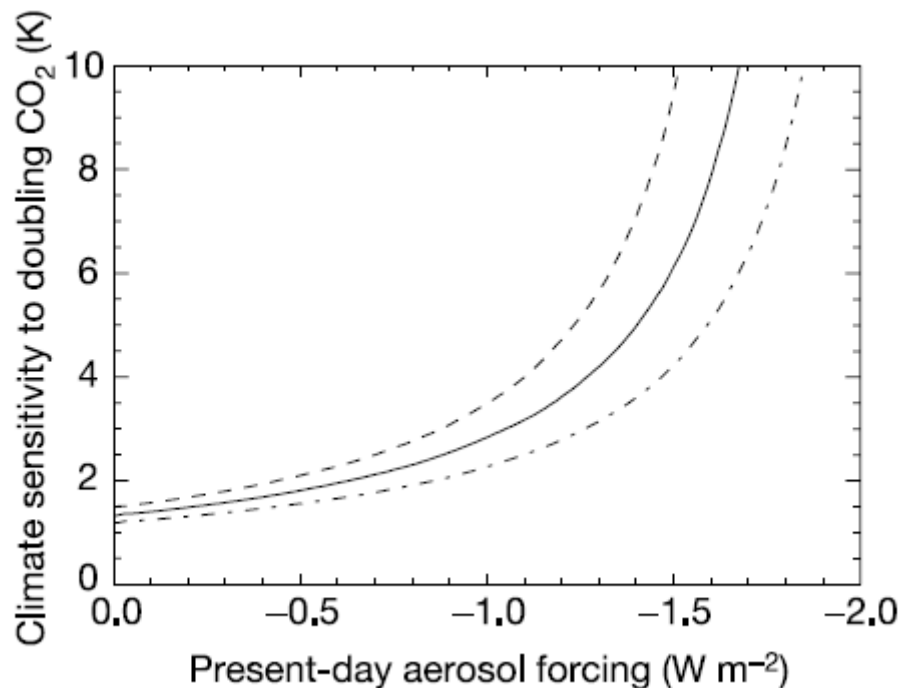




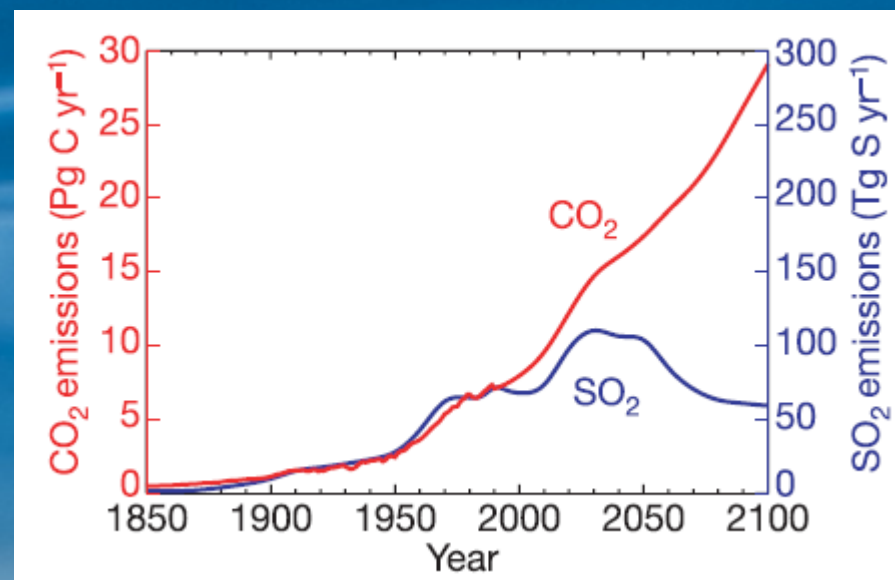
Manipulating the total (net) forcing and climate sensitivity in a model outside the theoretical range (back lines in left panel) and its result for 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> century climate modeling. Blue symbols and lines are the IPCC AR4 model ensemble with weak correlation ( $r = -0.5$ ).



# Nie ma się z czego cieszyć...



Globalne ocieplenie występuje pomimo wymuszenia aerozolowego. Im silniejsze jest zatem ono obecnie tym większa musi być czułość klimatu na zmiany CO<sub>2</sub> (wzrost temperatury przy podwojeniu CO<sub>2</sub> powyżej). Zatem przyszły wzrost temperatur będzie tym większy im większy jest dziś wymuszenie aerozolowe. W dodatku koncentracja CO<sub>2</sub> rośnie a aerozolu maleje.



*Andreae, Jones & Cox 2005 (Nature)*

# Podsumowanie 3/3

- Efekt zwiększania ilości chmur przez aerozol („drugi bezpośredni”) jest większy niż efekt rozgrzewania troposfery i likwidacji chmur („pół-bezpośredni”) z wyjątkiem obszarów o dużej absorpcji aerozolu. Zwiększa to globalnie ilość chmur o około 5%. Zatem aerozol ma większy wpływ chłodzący na powierzchnię Ziemi niż sądzono jeszcze kilka lat temu.
- Niestety oznacza to, że klimat może być bardziej czuły na wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  co może oznaczać szybsze ocieplanie Ziemi.
- Szybszemu ocieplaniu Ziemi pomoże też fakt, że ilość aerozolu w atmosferze spadł od ok. 1990 r. (upadek ZSRR), zaś koncentracja  $\text{CO}_2$  wciąż rośnie.



*“Pojaśnienie” atmosfery Ziemi:  
skutek upadku systemu  
radzieckiego?*





Dziękuję za uwagę

Wyjątkowo w środę (20.1.2015 r.):  
Gazy o znaczeniu klimatycznym  
(cykl węgla,  $\text{CO}_2$ , metan, DMS)

10/16/2000 3:38pm

*Elektrownia węglowa: źródło  $\text{CO}_2$  w ilościach... przemysłowych*

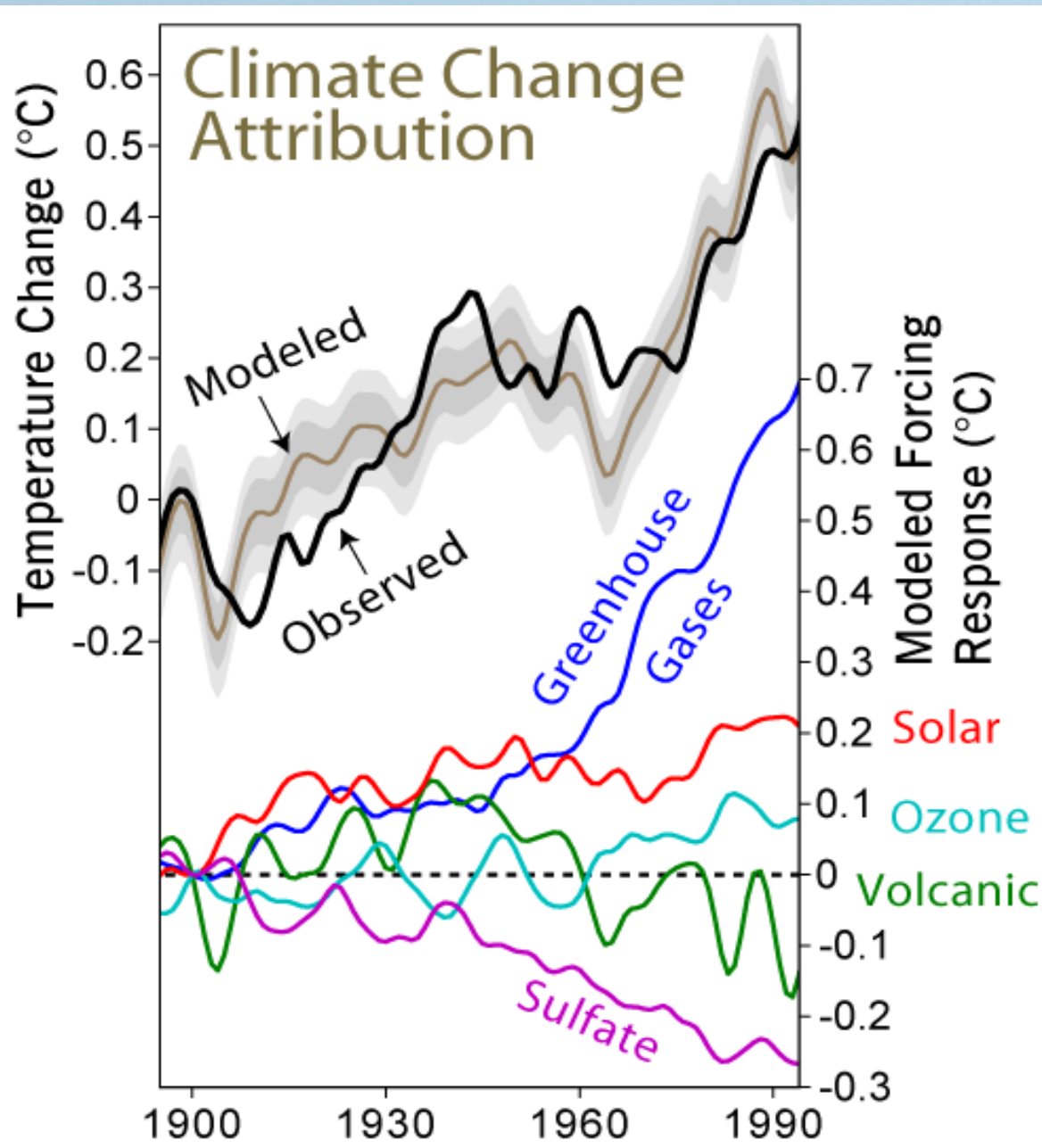




Wesołych Świąt  
i Szczęśliwego Nowego Roku!



# Aerosol needed to explain 20<sup>th</sup> century global temperature trends



It seems we do not need THC to explain the average changes of Earth temperature.

Warming of the 1920s and 1930s was caused by increasing solar activity and green house gases and a break in volcanism.

The cooling of 1950s and 1960s was due to more aerosol emission (industrial sulfur rich smoke) and increase of volcanism.

The last 30 years were dominated by greenhouse gases increase.



# Some conclusions

- ✓ Aerosol forcing is not yet well constrained. The CO<sub>2</sub> climate sensitivity depends on the global net aerosol forcing.
- ✓ The effects of 20<sup>th</sup> century inter-hemisphere gradient of aerosol forcing is not fully separated from changes in ocean meridional overturning (Atlantic Multidecadal Oscillation)
- ✓ Black carbon aerosol forcing is especially poorly known. It seems it plays an important role not only in the tropics but also in the Arctic.
- ✓ Sulphate aerosols have been decreasing for 30 years while black carbon emissions increased. The two effects most probably explain why Europe and the Arctic warmed up faster than predicted by climate models.