

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 7:

Aerozol: wielka niewiadoma klimatyczna

Jacek Piskożub

Studium Doktoranckie IOPAN, semestr letni 2007 r.

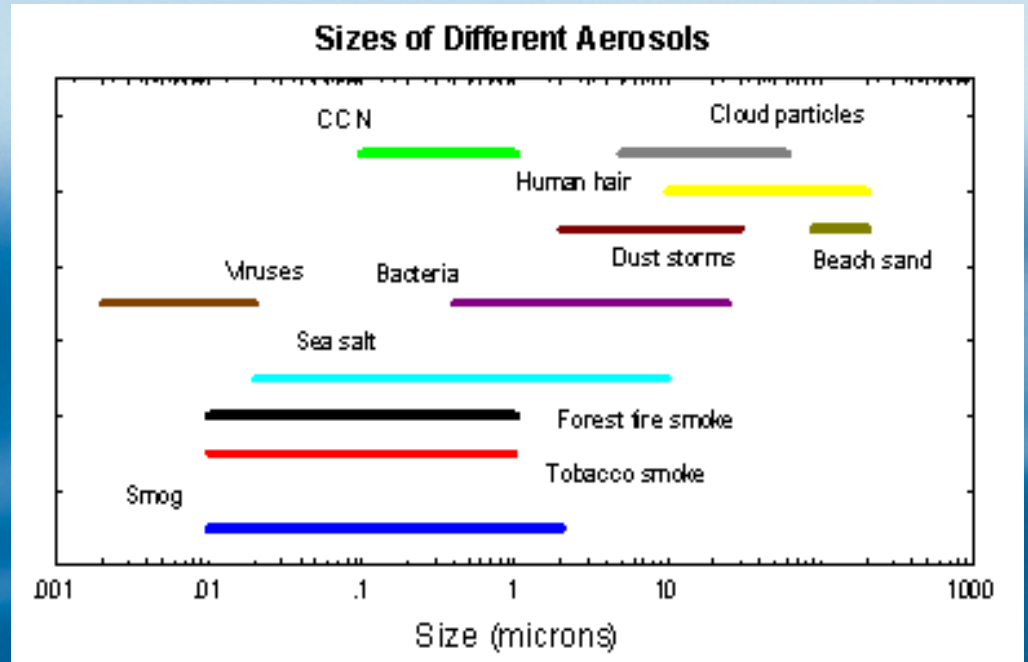
<http://www.iopan.gda.pl/~piskożub/klimat/>

# Jacek Piskożub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów 19.02-14.05.2007

- ✓ 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, NAO*)
- ✓ 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

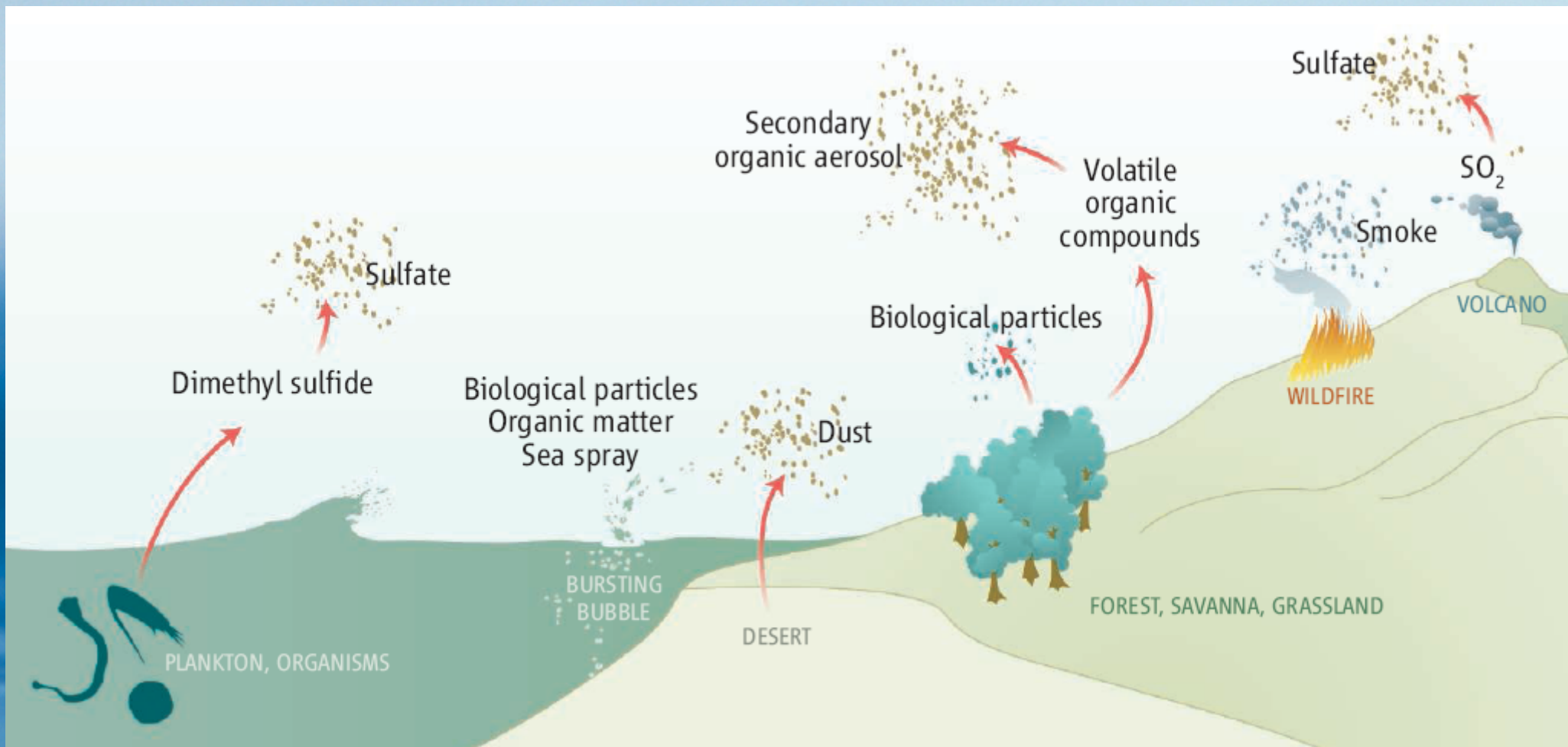
# Aerozole: definicja

Aerozole to zawiesina stałych i ciekłych cząstek w gazie. Z przyczyn historycznych za aerazol 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 (*aerazol antropogeniczny*). Bezpośrednio z kondensacji gazów atmosferycznych, głównie związków siarki, pochodzi *aerazol wtórny*, drobne cząstki submikronowe, jedno ze źródeł jąder kondensacji chmur (CCN).

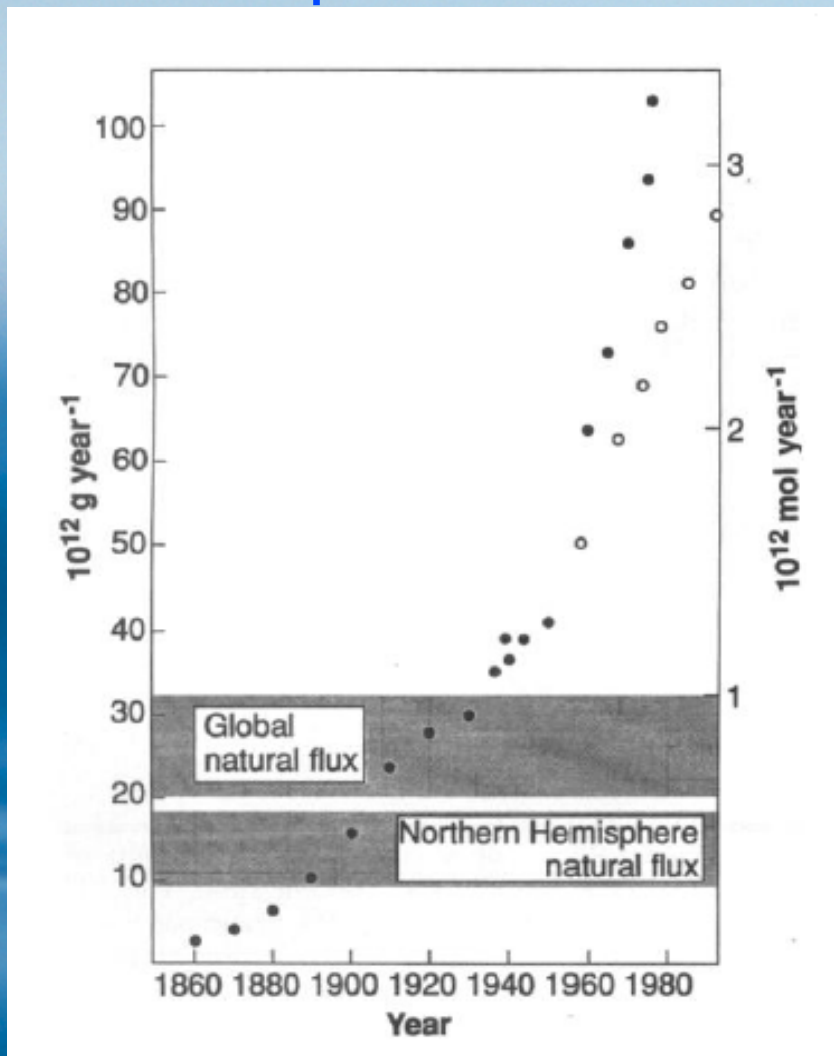
# Naturalne źródła aerozolu



Naturalne źródła aerozolu zarówno na morzu jak i na lądzie rzadko dostarczały więcej niż 50-200 jąder kondensacji chmur na  $\text{cm}^3$  (cząstki  $> 90 \text{ nm}$ ). Obecnie niewiele jest rejonów z tak małą ilością aerozolu (głównie odległe rejonny oceanów szczególnie na półkuli południowej).

## „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.

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

*Charlson et al. 1992 (Science)*

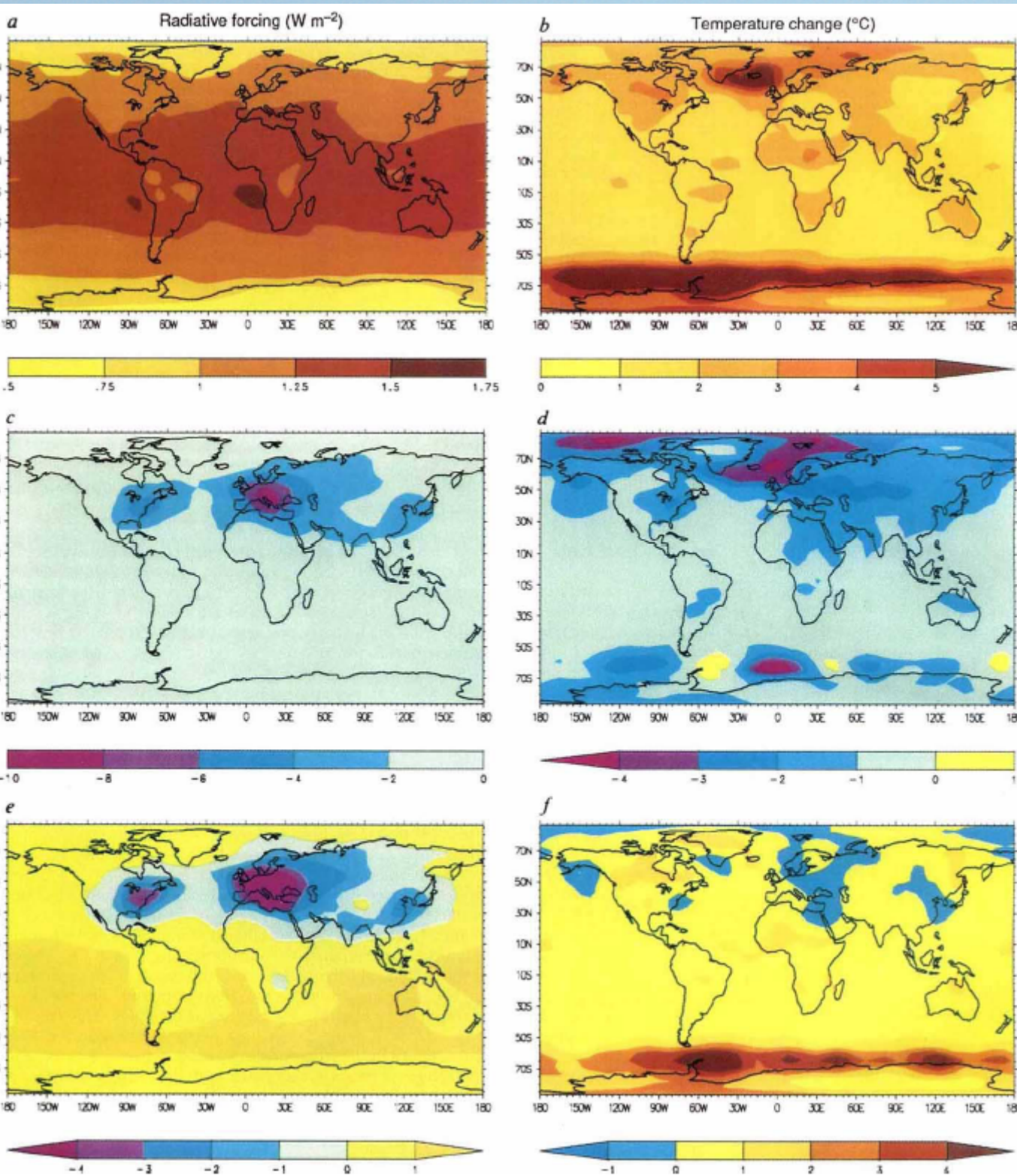
*Emisja związków siarki do atmosfery ziemskiej (wg. dwóch ocen) – stan wiedzy na 1992 r. “Wymuszanie” związane z aerozolem oceniano na 1 W/m<sup>2</sup>*

# Równowaga?

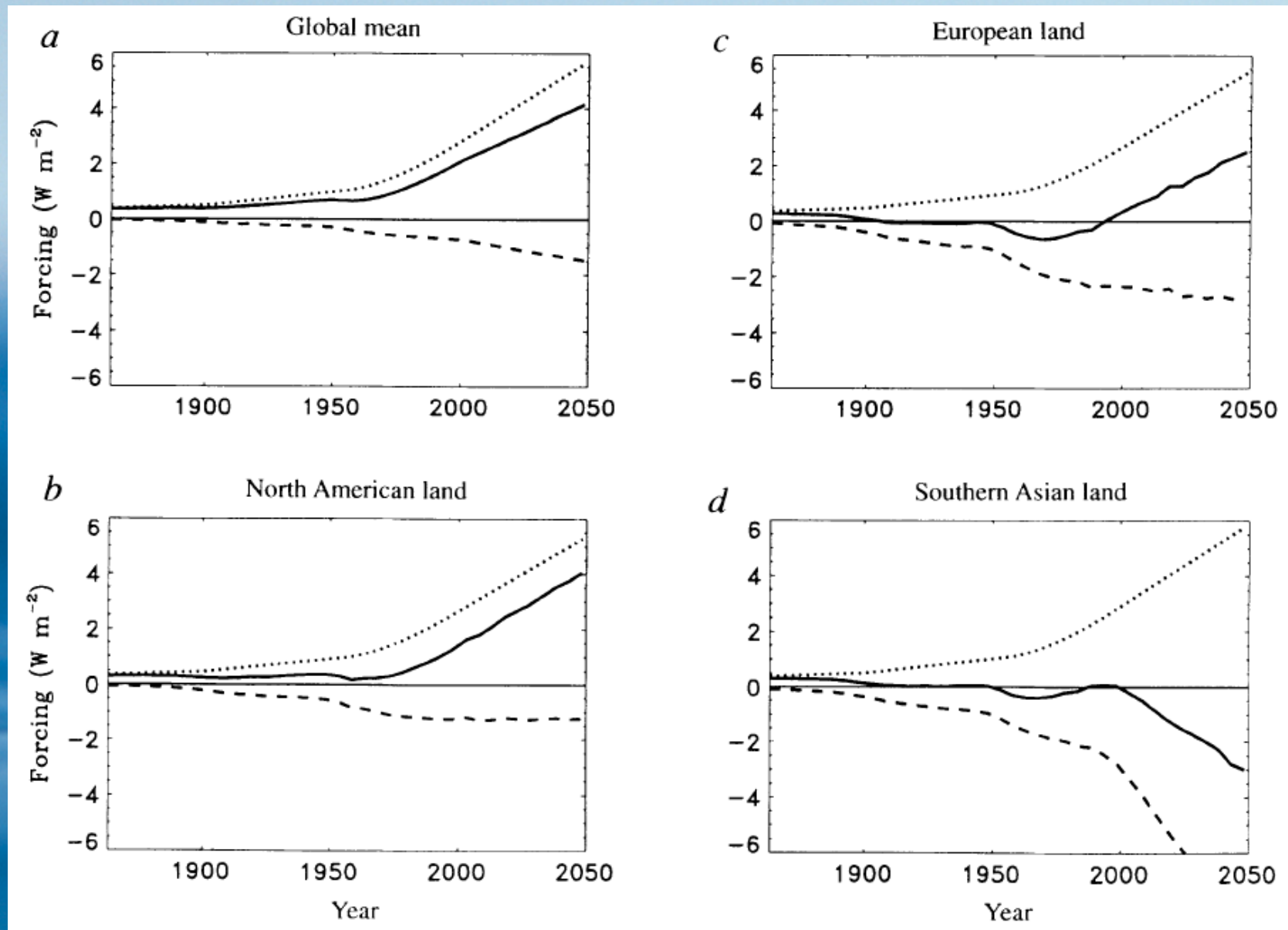
Ocena z roku 1994: wymuszanie radiacyjne (po lewej) i zmiany temperatury (po prawej) związane z gazami cieplarnianymi (góra), aerozolem (środek) i sumaryczne (dół).

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

*Taylor & Penner 1994 (Nature)*



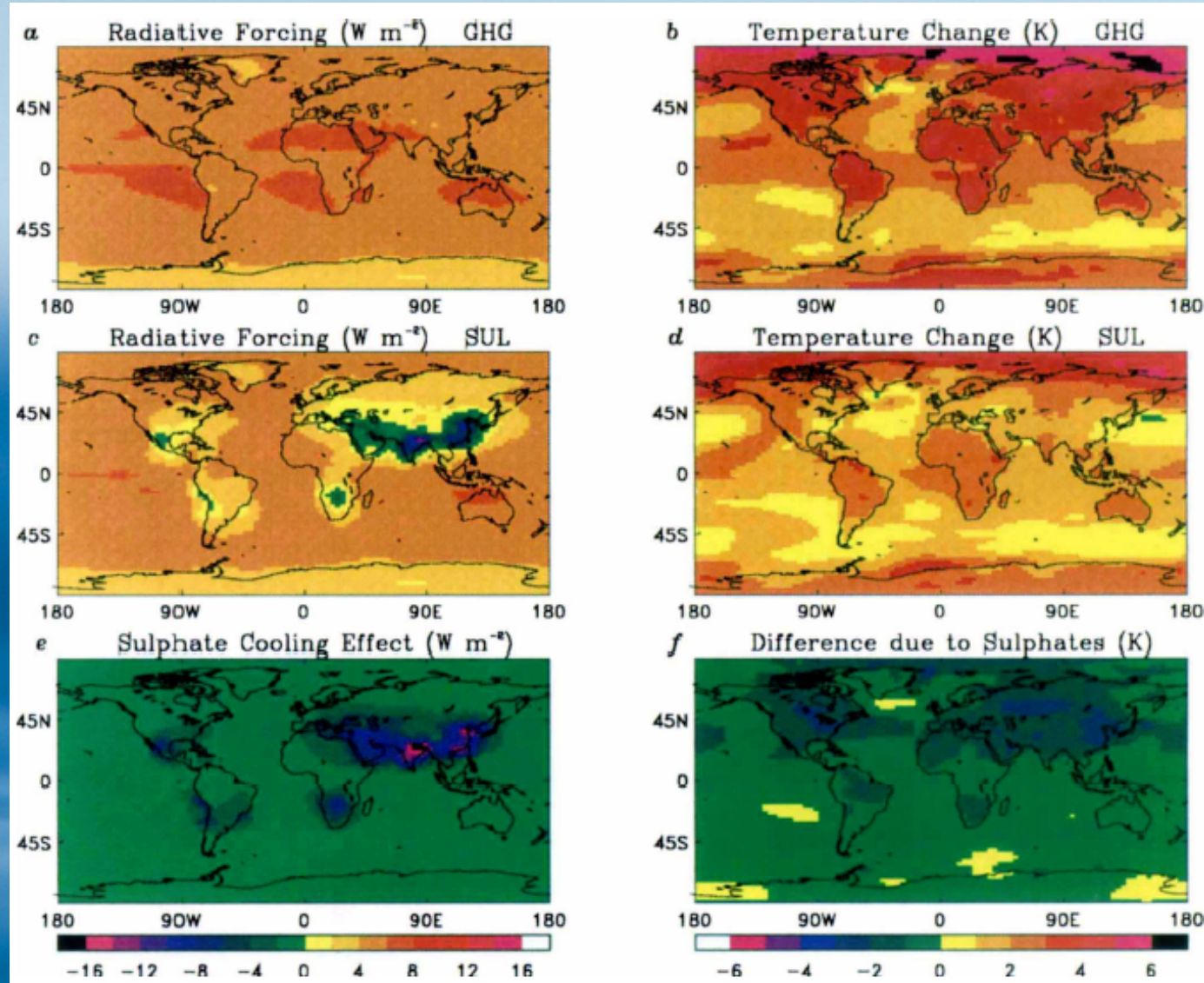
# Równowaga jednak nie trwała



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.

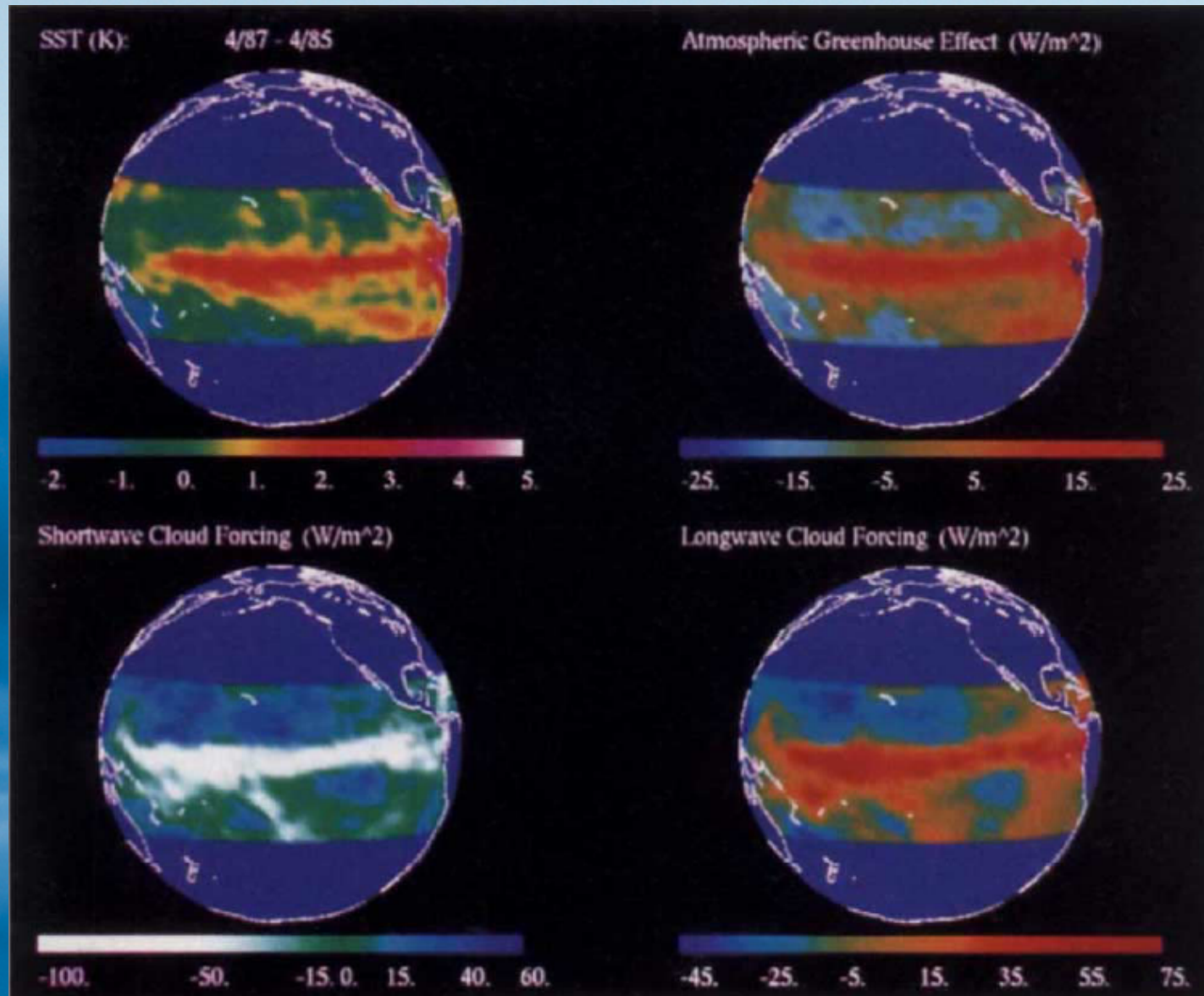
*Mitchell 1995 (Nature)*

# Rozkład geograficzny (ta sama prognoza)



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

# Chmury też mają znaczenie

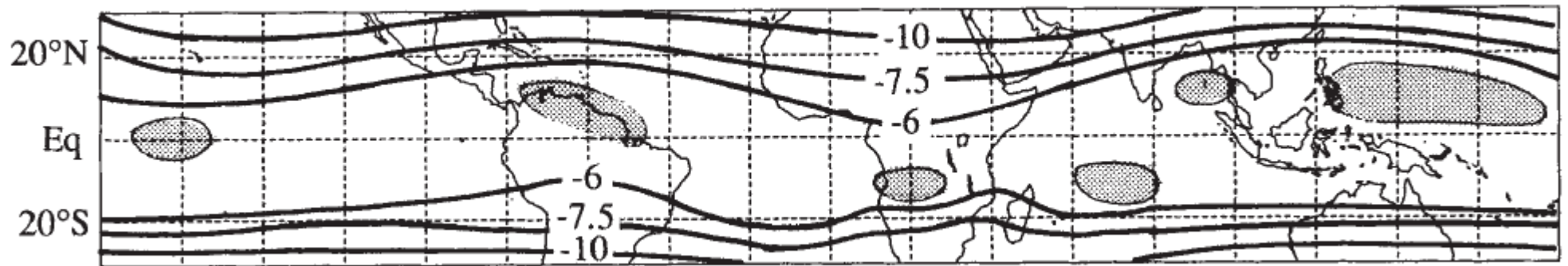


Zmiany temperatury, atmosferycznego efektu cieplarnianego (para wodna), albedo chmur (rozpraszanie) i efektu cieplarnianego z nimi związanego (absorpcja) podczas El Niño w 1987 roku.

*Ramanathan & Collins 1991 (Nature)*

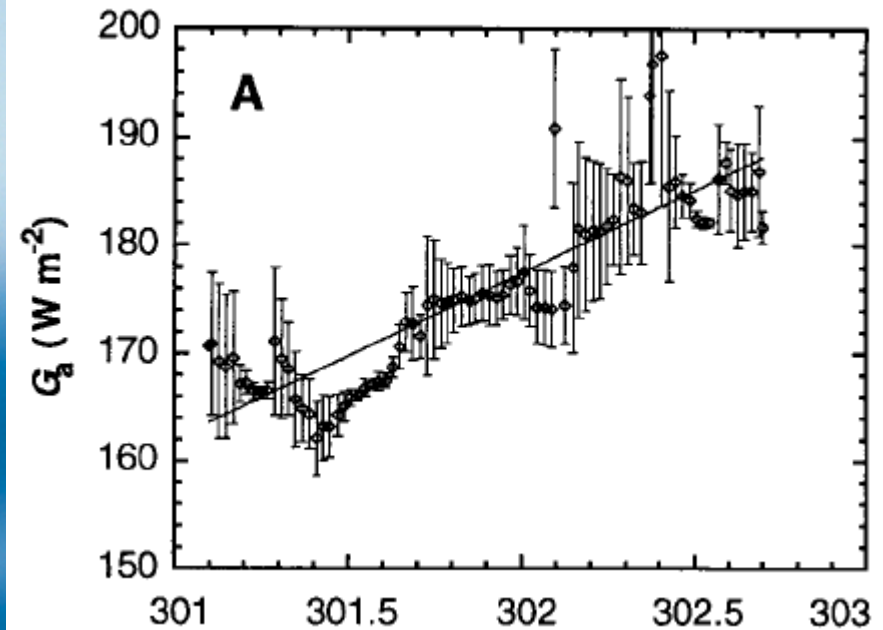
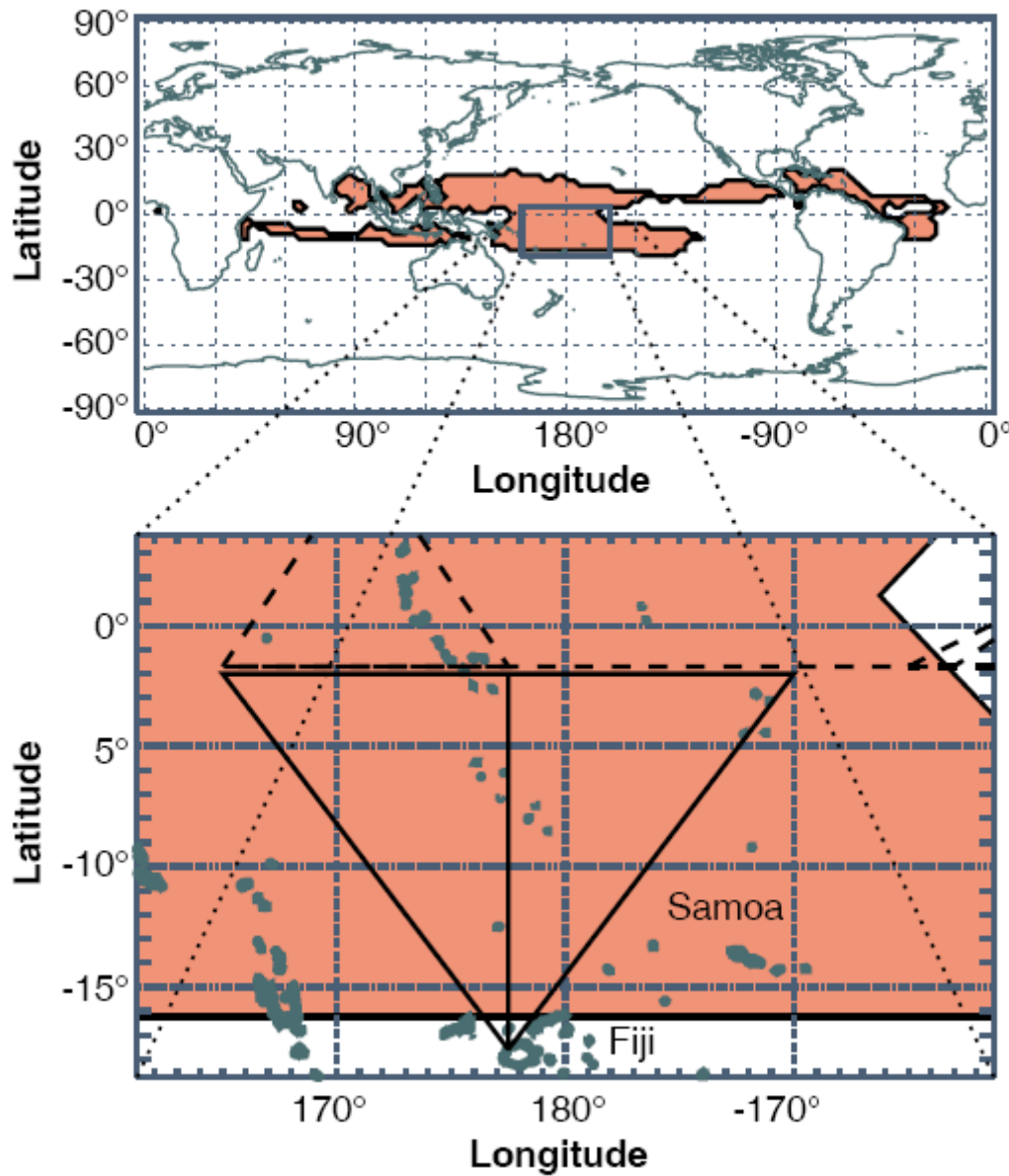
# Czy chmury są termostatem tropików?

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.

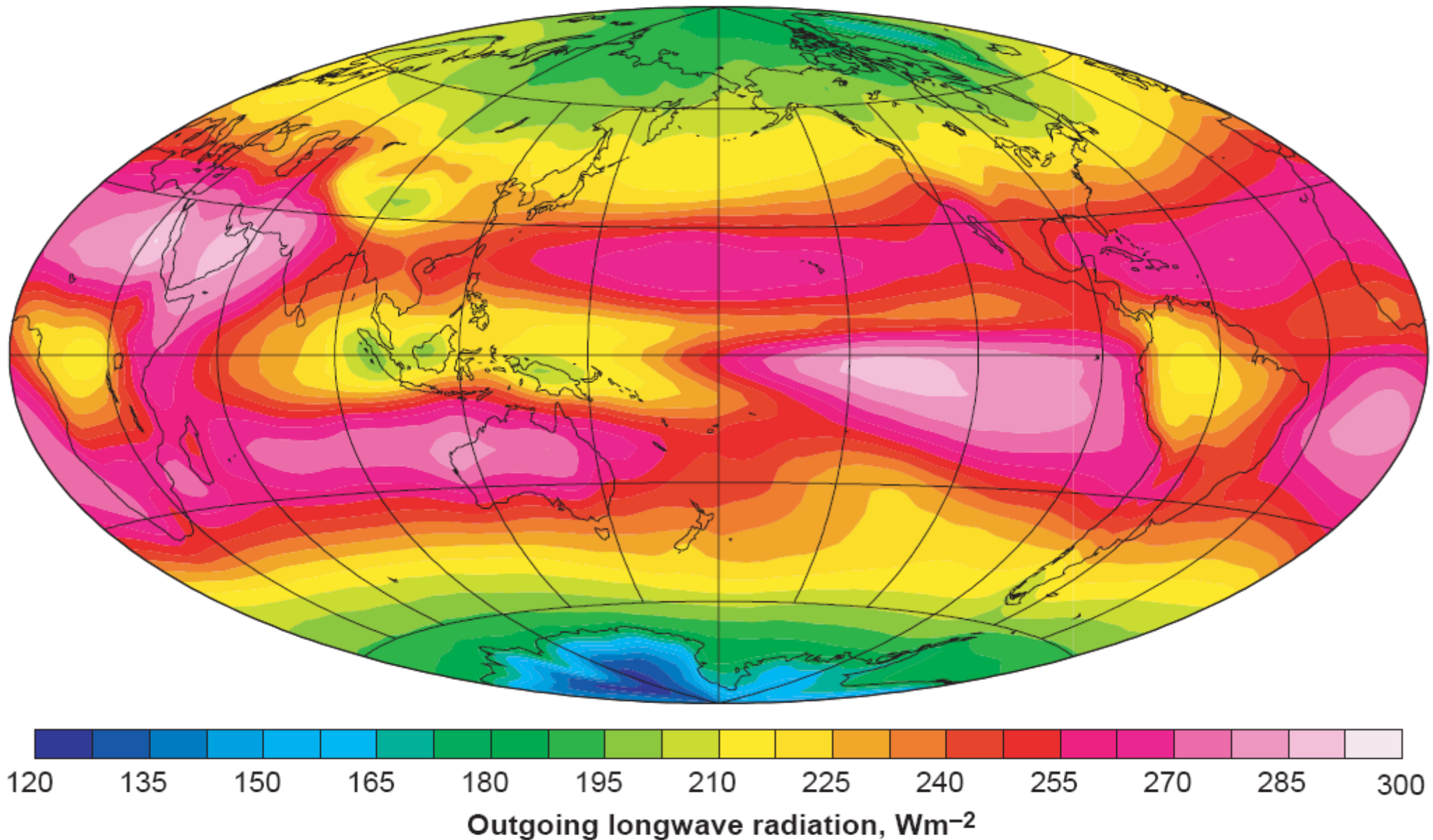


Badania przeprowadzone nad Pacyfikiem z samolotów meteorologicznych wykazały, że nad obszarami bezchmurnymi para wodna powoduje wzrost lokalnego efektu cieplarnianego o 13-15  $W m^{-2}$  na każdy stopień wzrastającej temperatury morza.

*Valero et al. 1997 (Science)*

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

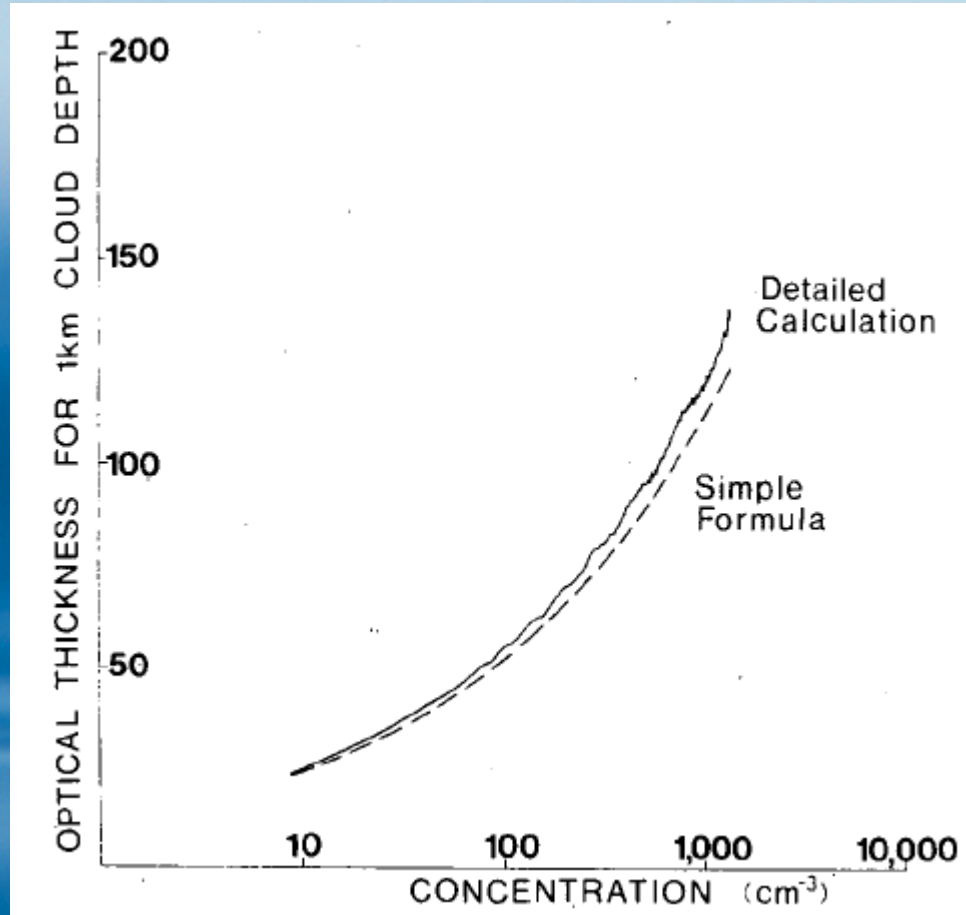
# Efekt cieplarniany chmur



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 kropelek.*

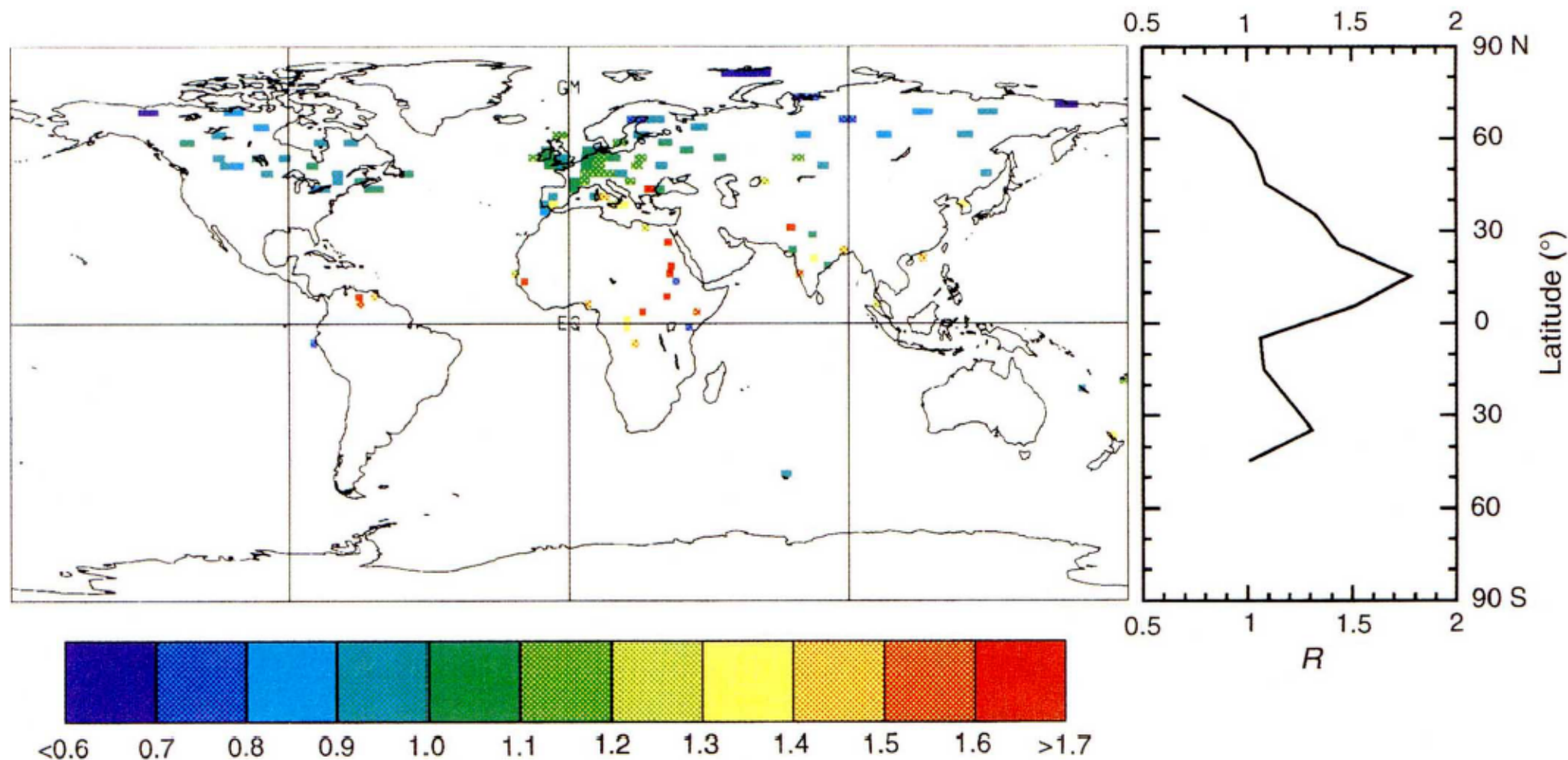
Większa ilość jąder kondensacji powoduje większą koncentrację kropelek w chmurze. Ponieważ dla cząstek o małym promieniu  $r$  efektywność rozpraszania jest większa. Dlaczego?

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

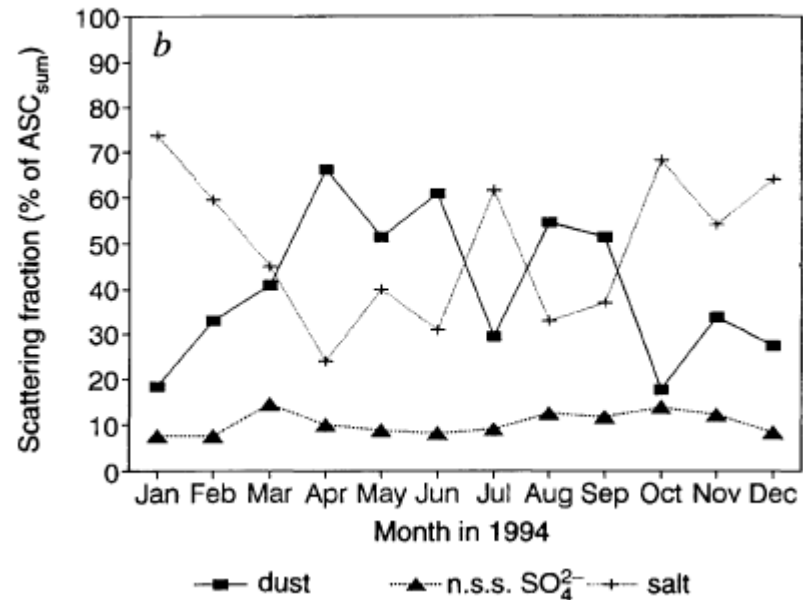
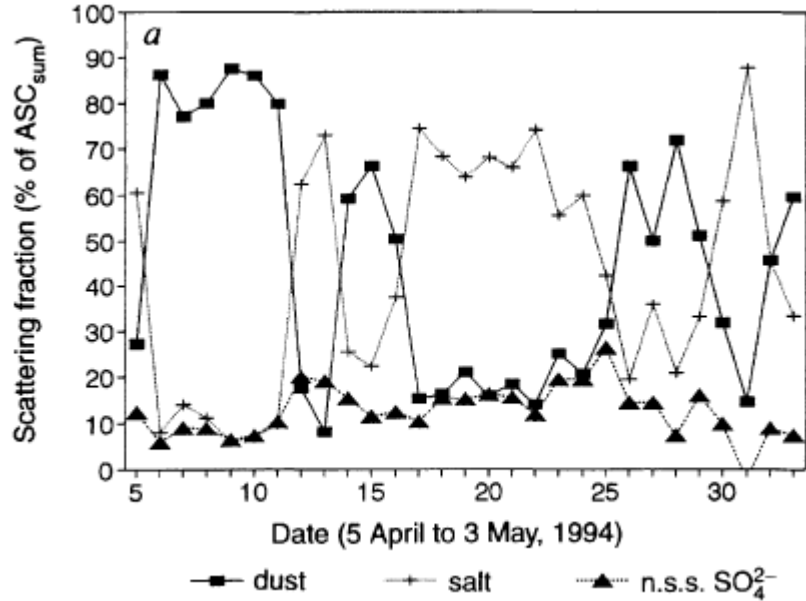


W połowie lat pięćdziesiątych okazało się, że chmury (przynajmniej w niektórych rejonach świata – na rysunku dla  $R > 1$ ) absorbują w zakresie widzialnym mimo, że woda jest przezroczysta. Kto winny? Aerozol.

*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



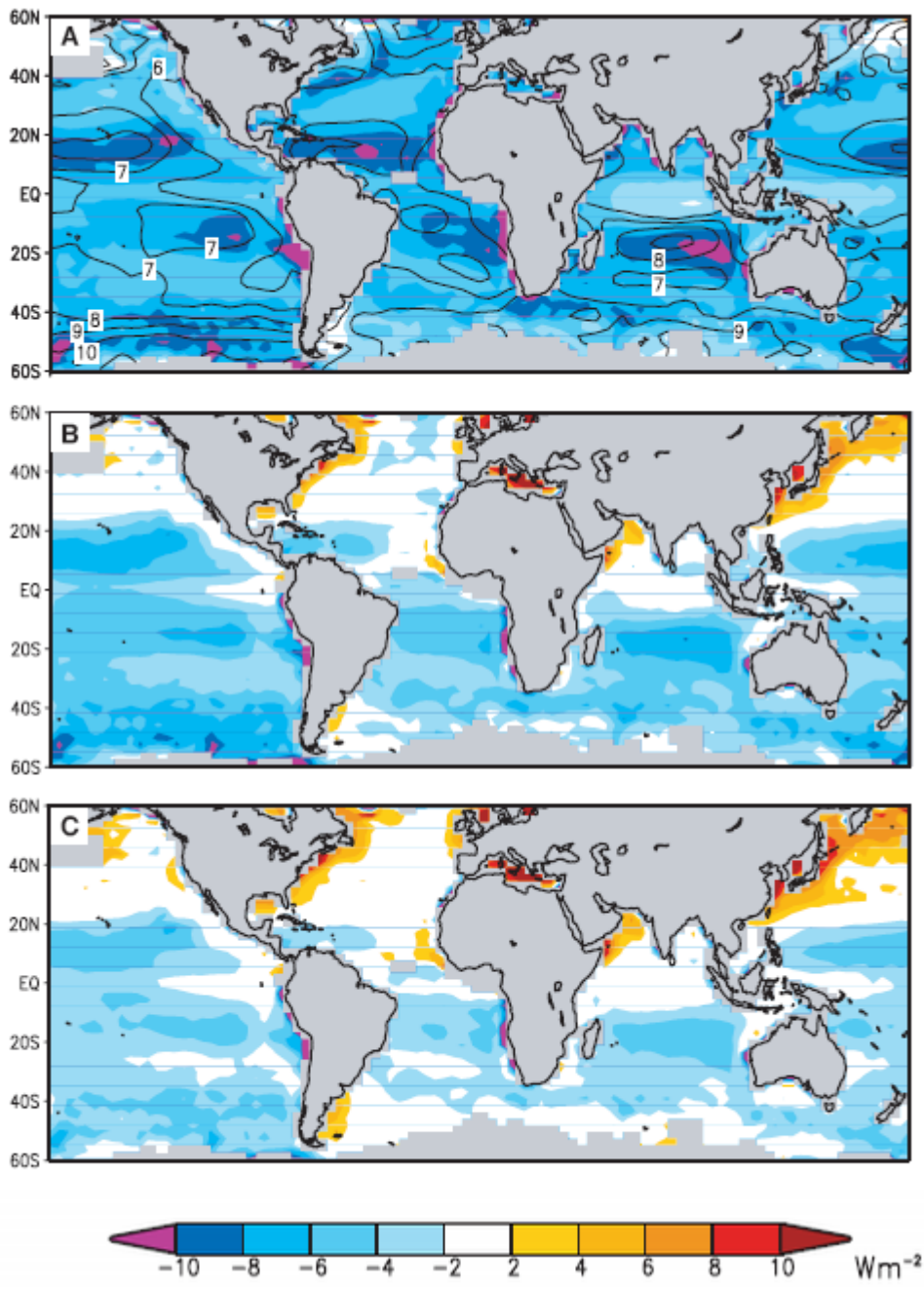
Pomiary aerozolowe na Barbadosie (Karaiby) wykazały, że pył (głównie pochodzący z Sahary) przyczynia się tam do całkowitego rozpraszania światła w atmosferze średnio cztery razy bardziej niż związki siarki. Także sól morską jest w warunkach cyrkulacji oceanicznej ważniejsza niż związki siarki.

# Sól morską

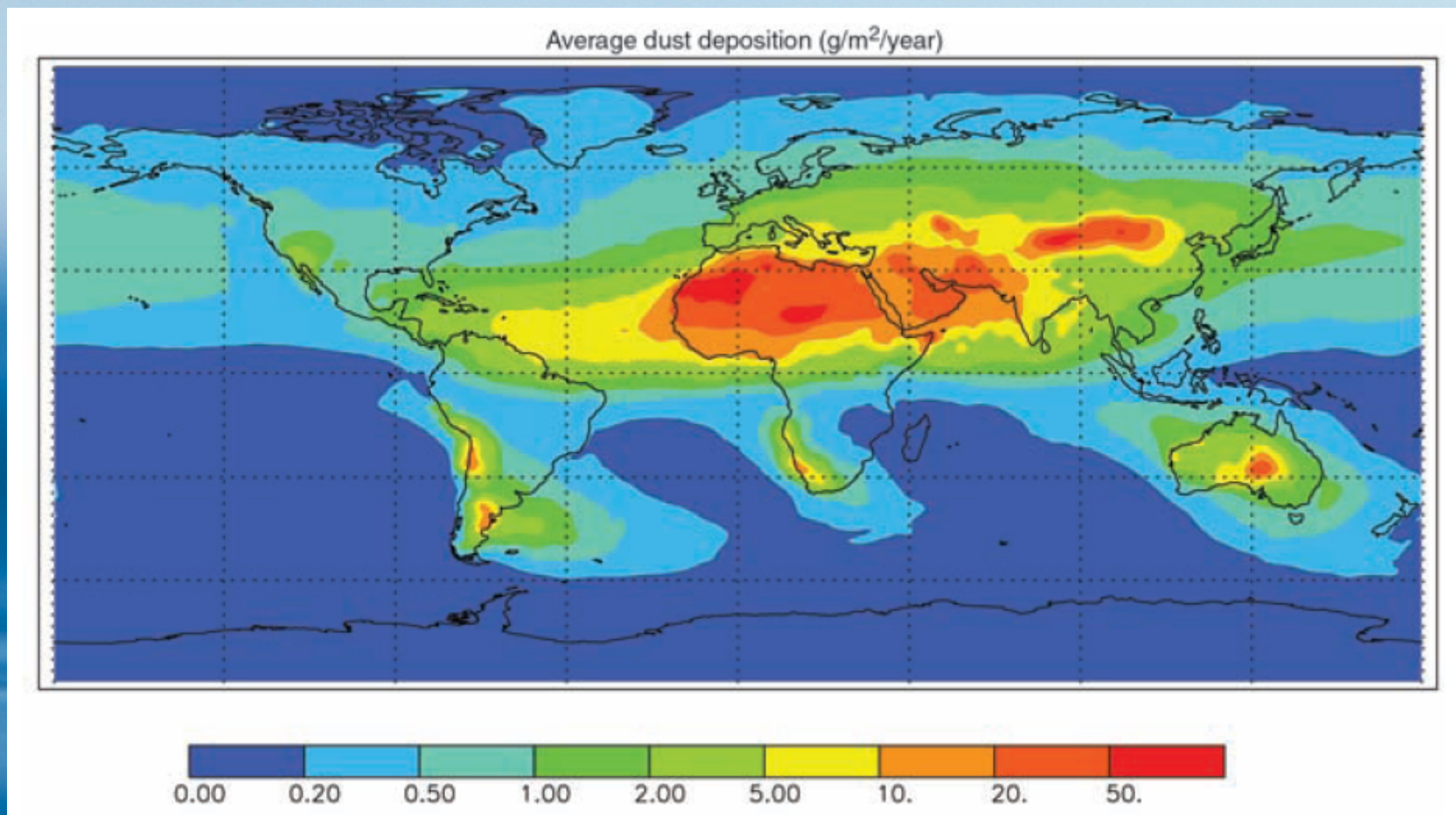
Porównanie wyników modelu klimatycznego i obserwacji satelitarnych albedo Ziemi:

- 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.

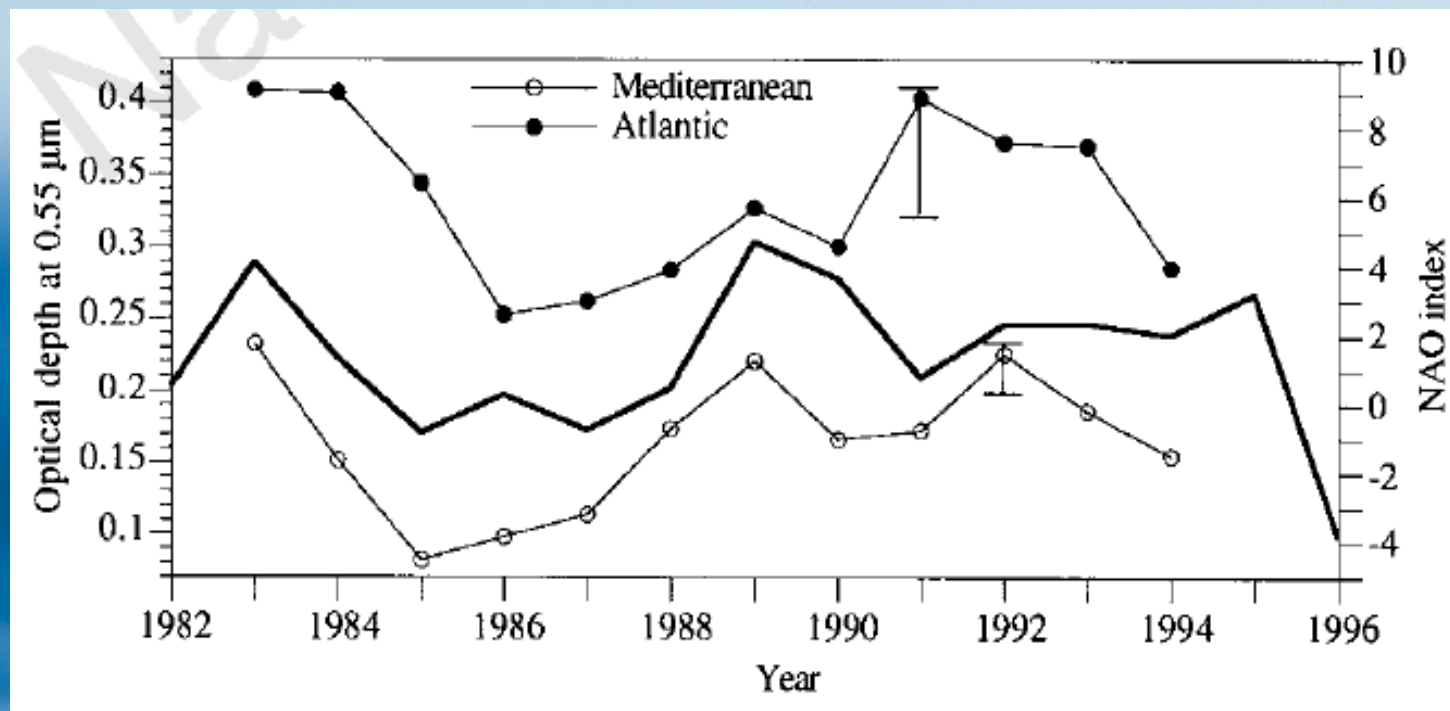


# Opad pyłu pochodzenia kontynentalnego



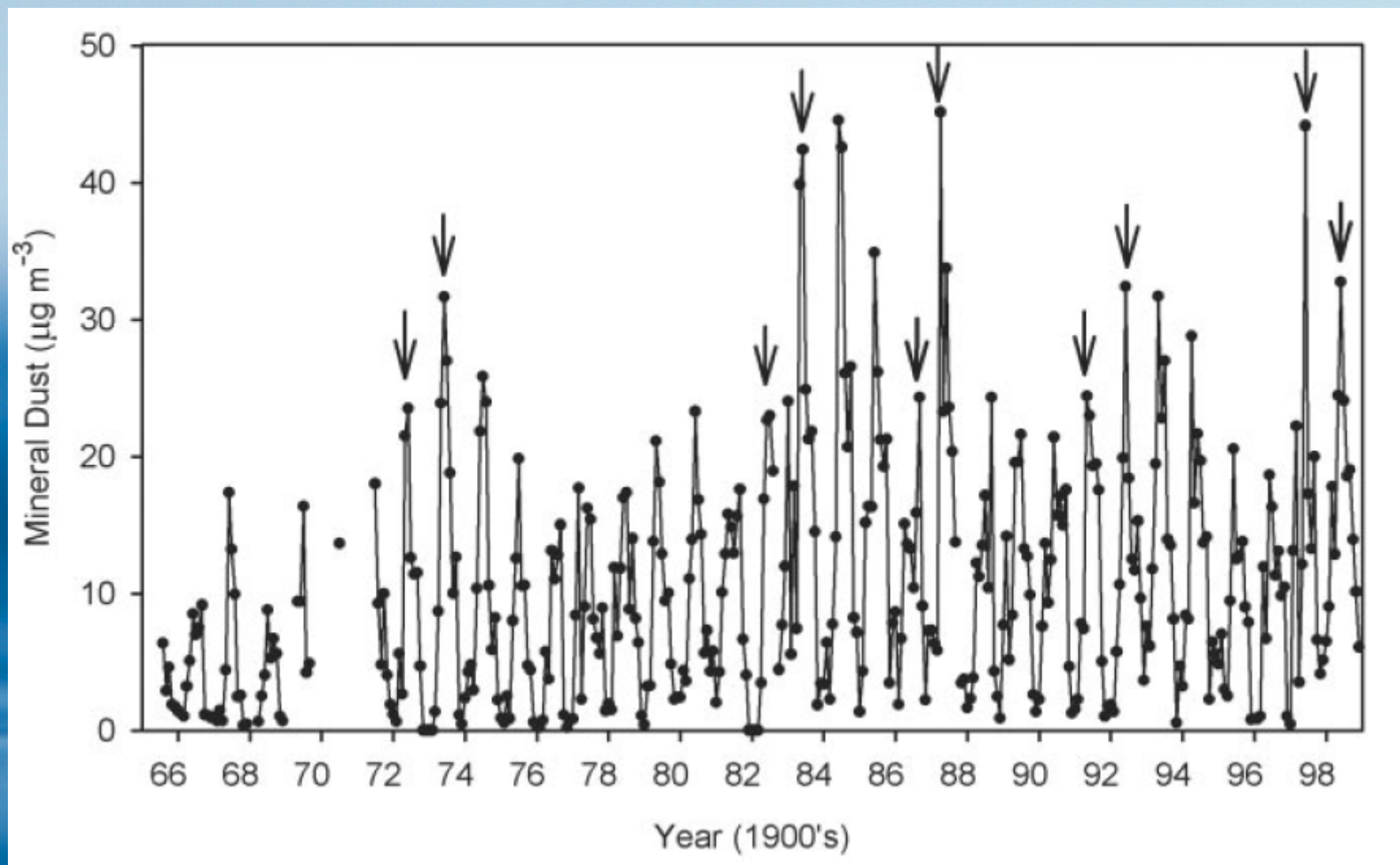
Opad pyłu kontynentalnego (średnia z trzech modeli) ocenia się na 450 Tg/rok, z czego 43% na Północnym Atlantyku, 25% Oceanie Indyjskim i 15% na Północnym Pacyfiku. Na południowej półkuli łącznie poniżej 20%.

# 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  $r = 0.66$ .

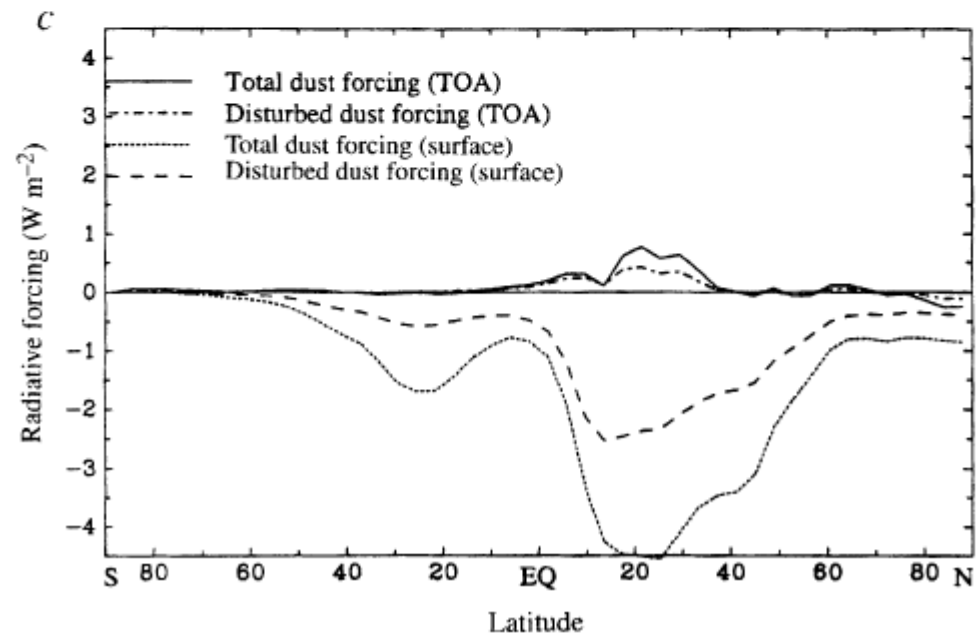
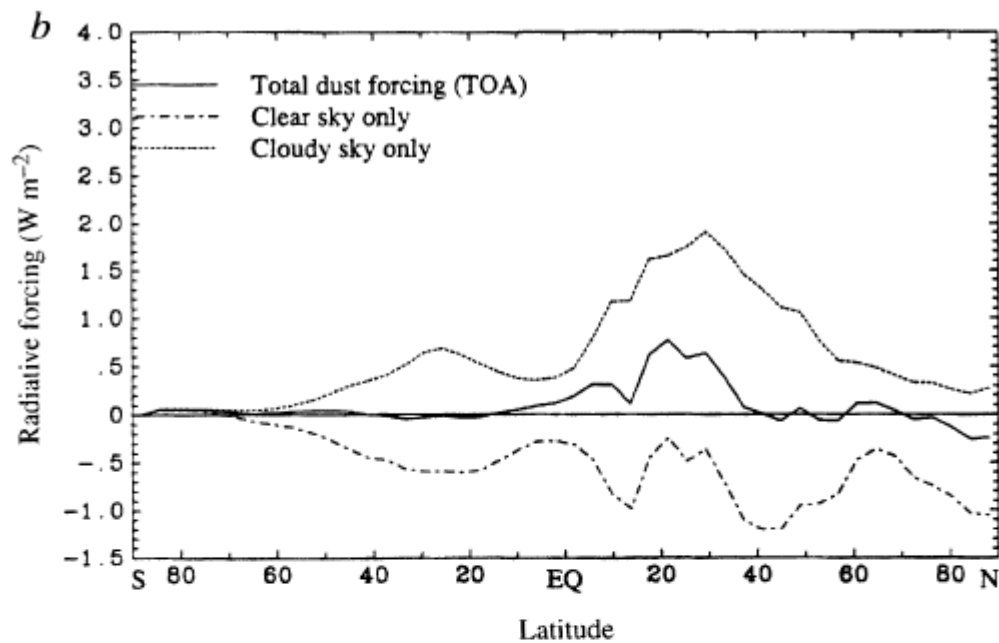
# Opad pyłu z Sahary skorelowany z El Niño



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)*

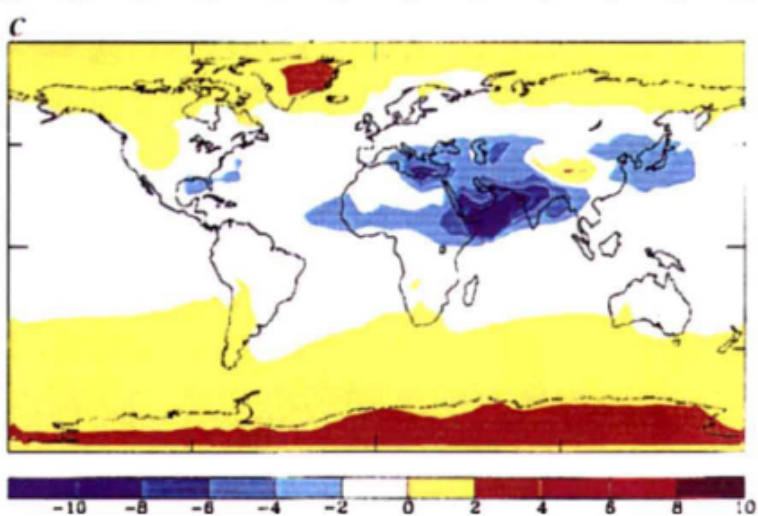
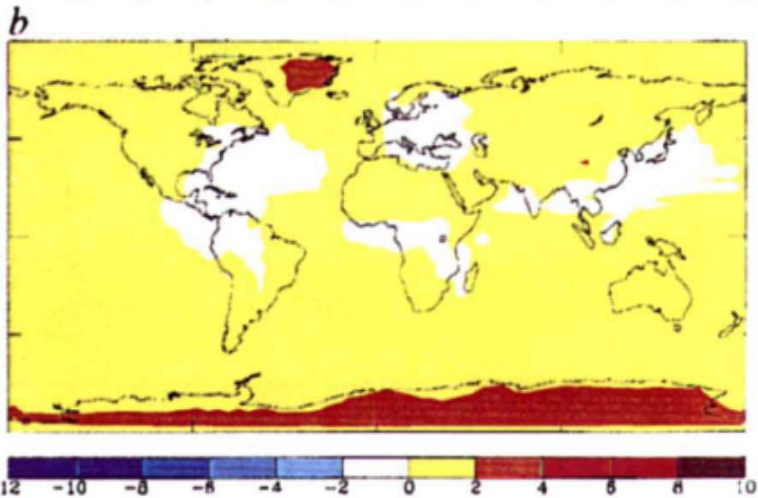
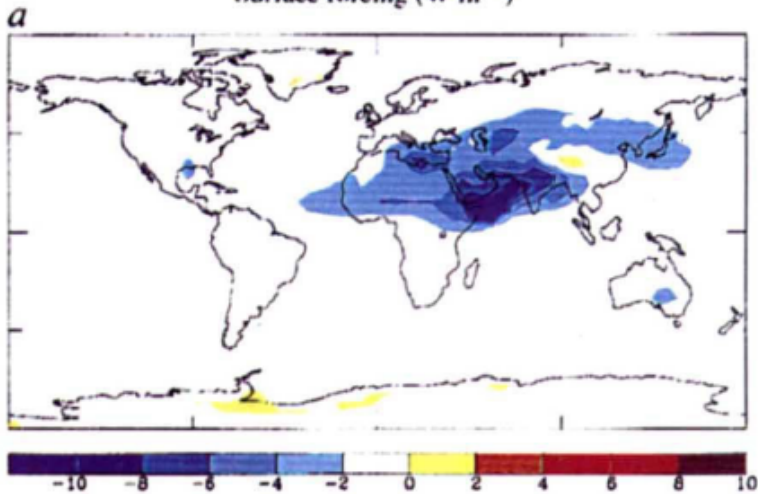
# Wpływ pyłu: oziębianie powierzchni ziemi i ogrzewanie atmosfery



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

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

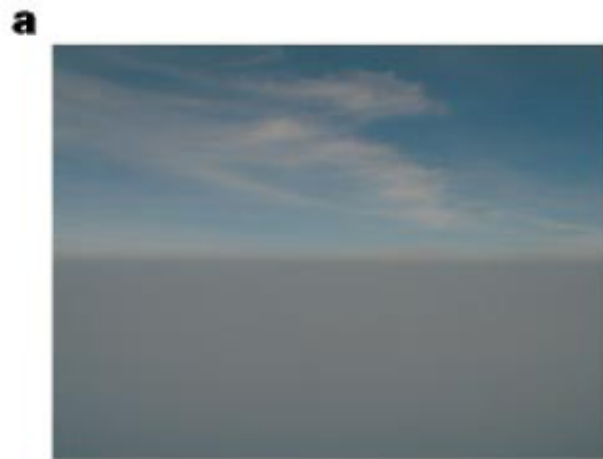


## Wpływ pyłu: oziębianie powierzchni powierzchni ziemi i ogrzewanie atmosfery

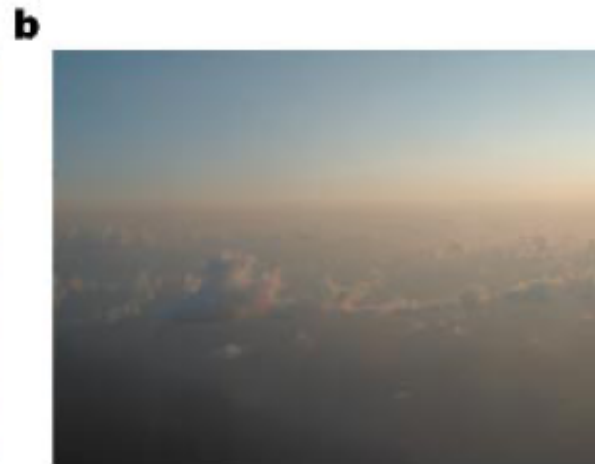
Na rysunku (stan wiedzy na 1996 r) wyliczone wymuszanie na powierzchni ziemi związane z pyłem (górze), gazami cieplarnianymi i aerozolami zawierającymi siarkę (środek) oraz sumaryczne (dół).

Czy to już cały wpływ aerozolu?  
Niestety nie.

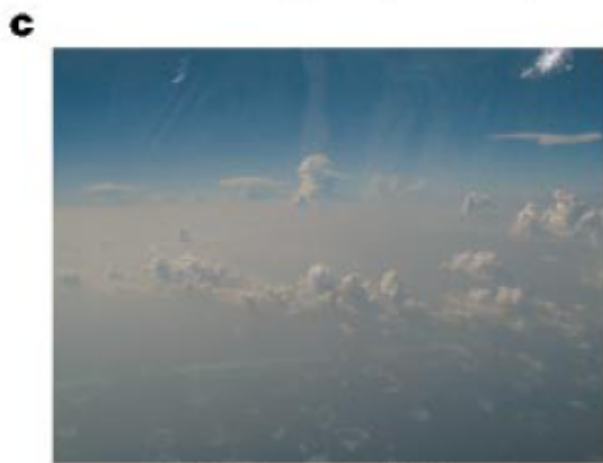
# Aerozol zawierający sadzę nad Oceanem Indyjskim



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



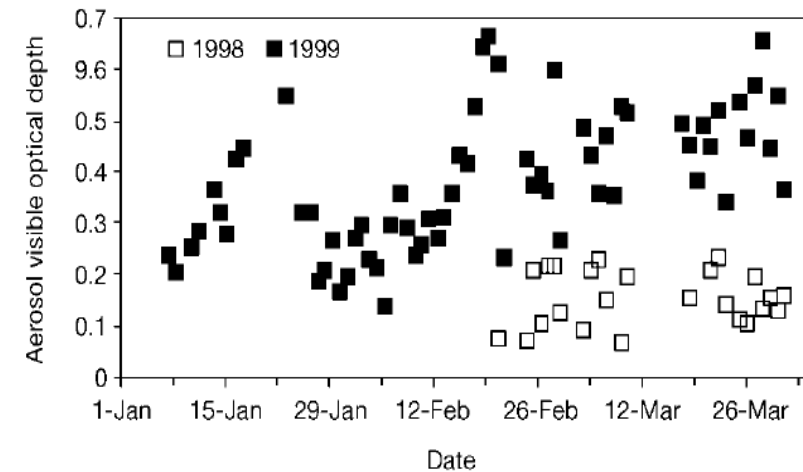
25 March, 1999: clouds under  
thick haze (3.0°N, 74.5°E)



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

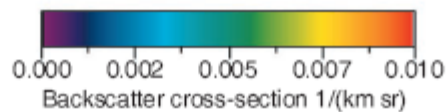
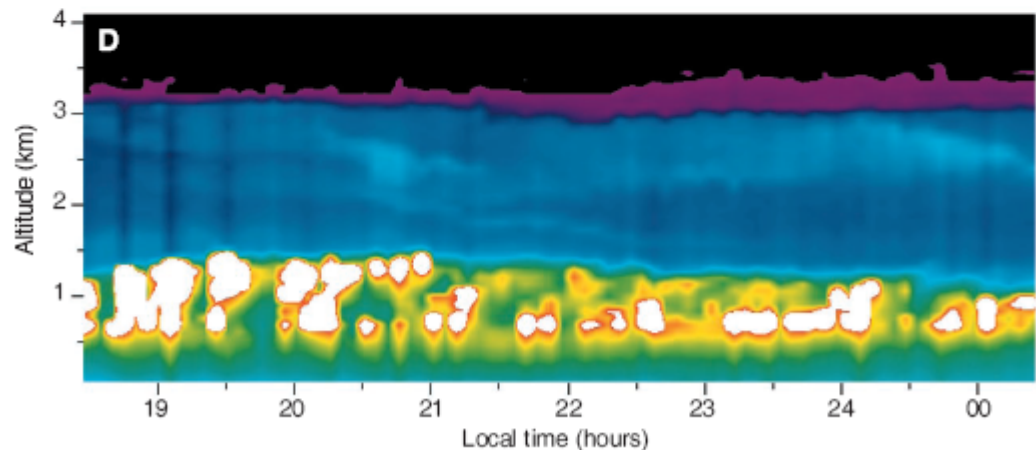
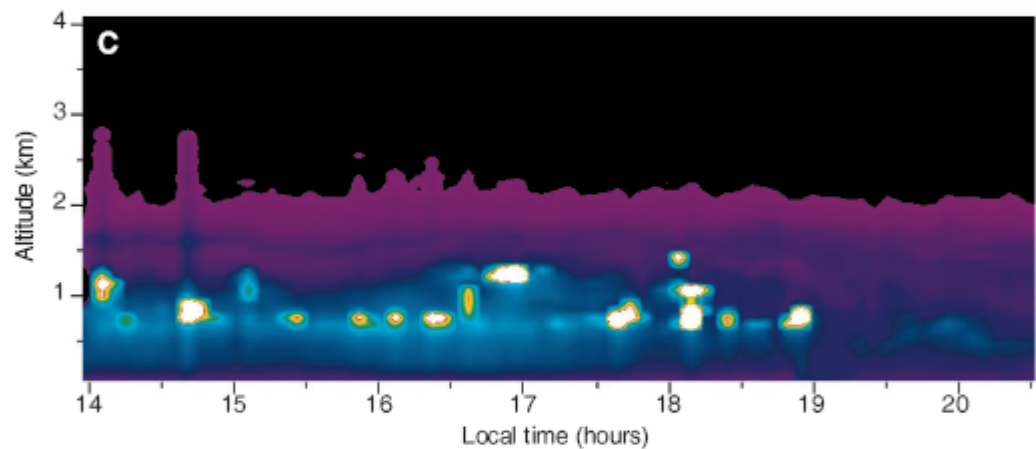
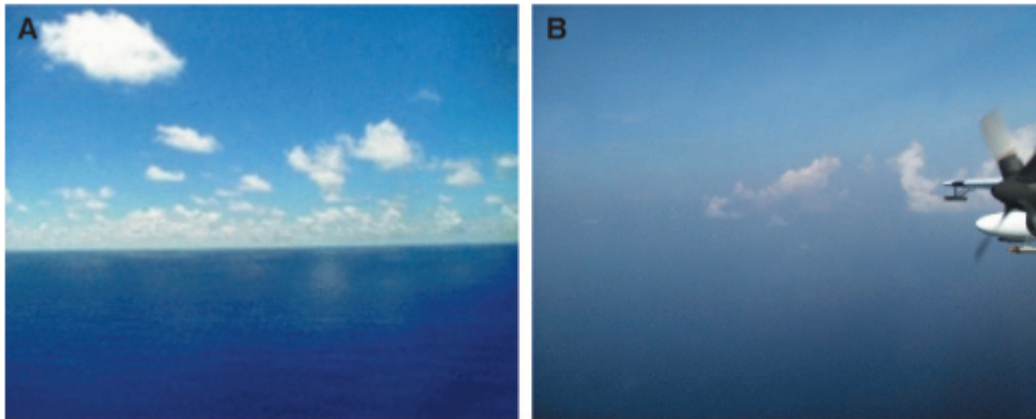


24 March, 1999:  
south of ITCZ;  
almost pristine clouds  
(7.5°S, 73.5°E)



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>

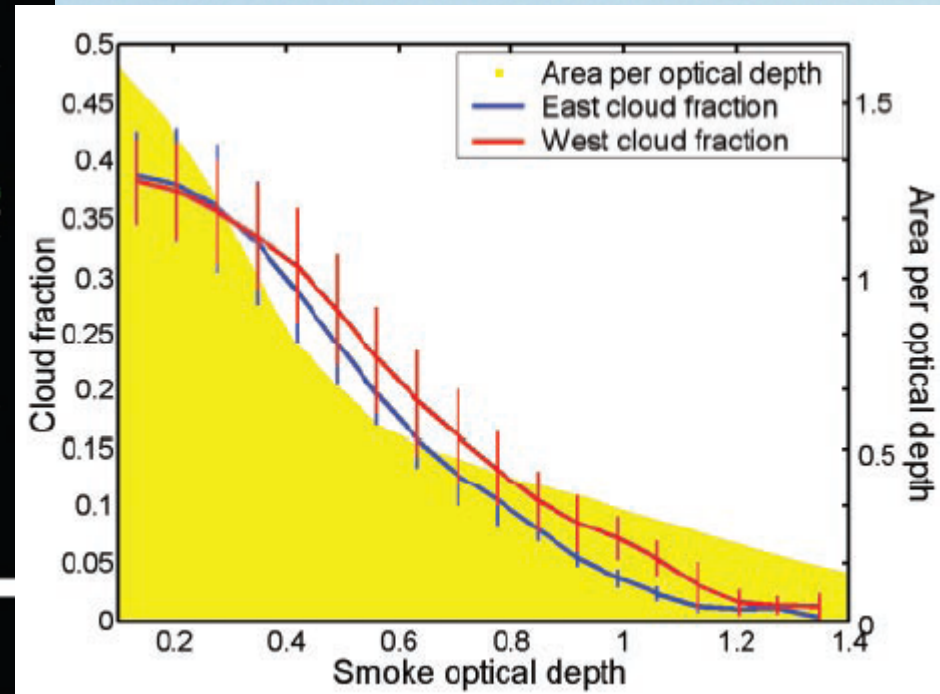
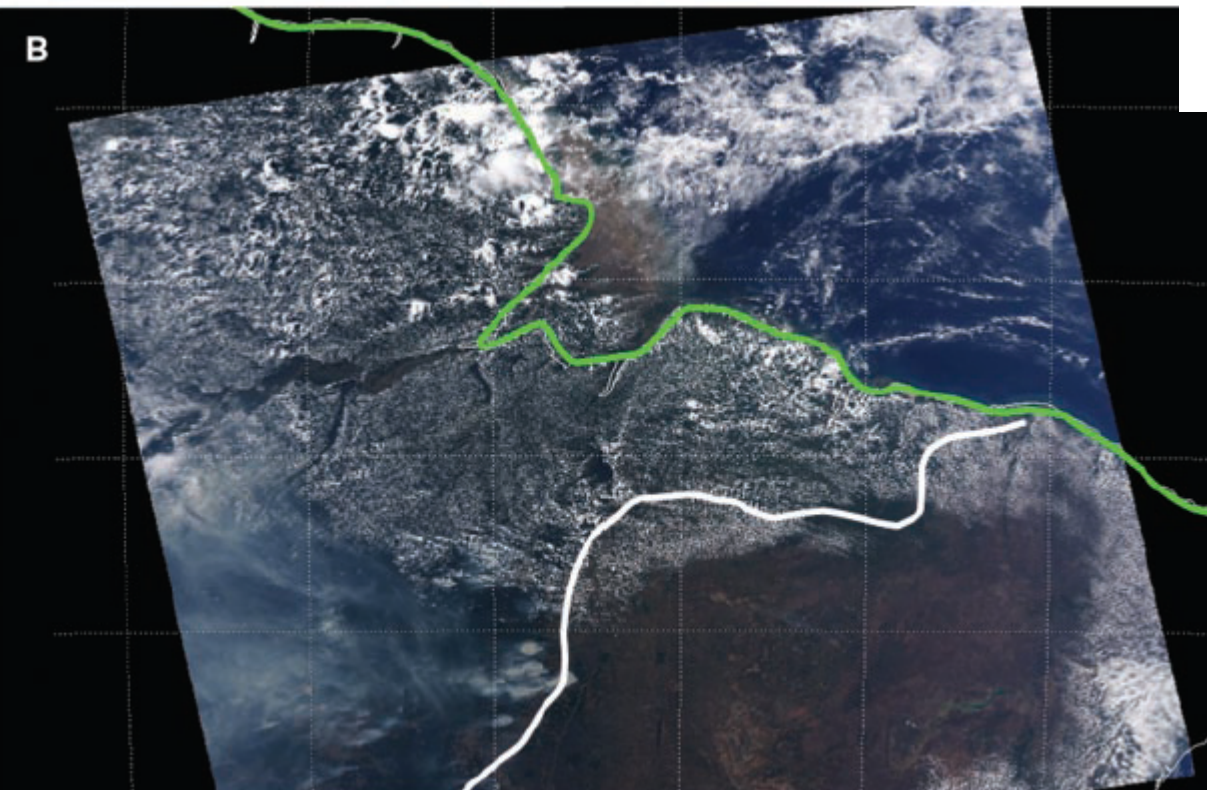
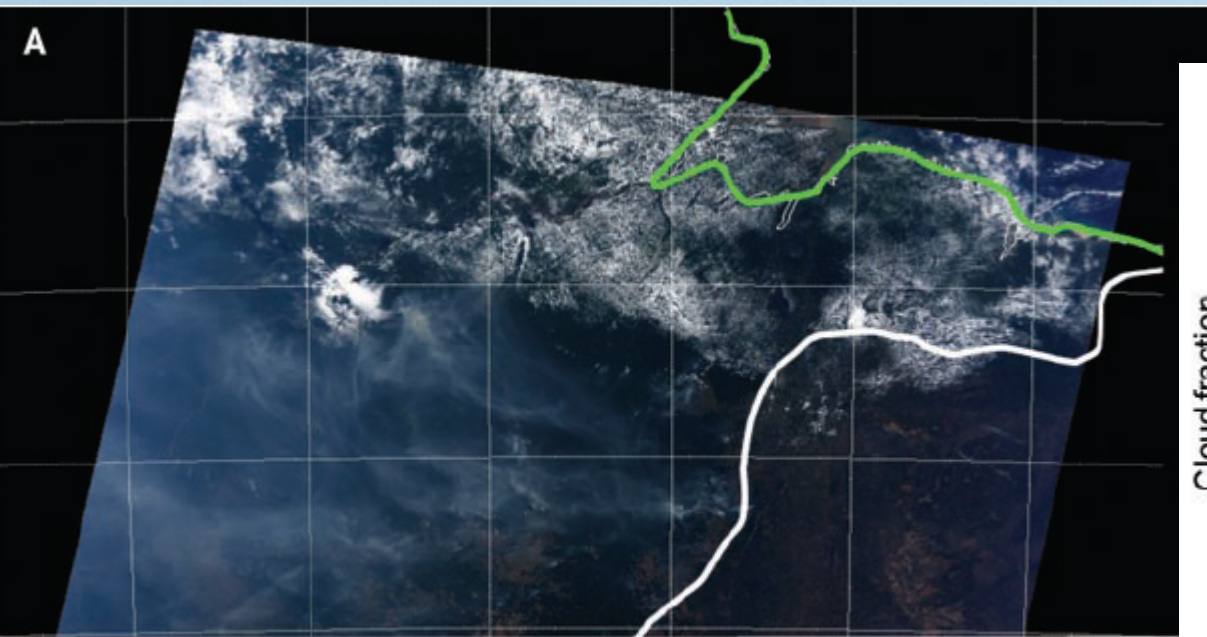
# Ogrzewanie przez aerozol może powstrzymać rozwój chmur



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 ( $+0.47 \text{ W/m}^2$ )

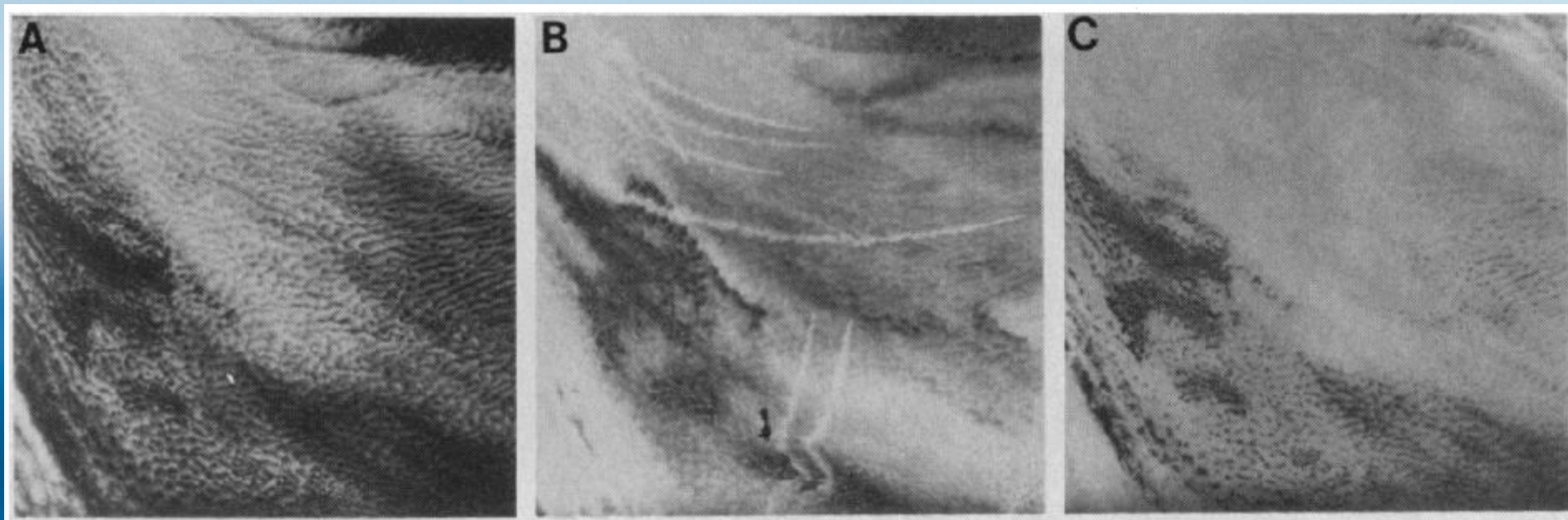
*Ackerman et al. 2000 (Science)*

# Požary lasów w Amazonii



Požary 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  $+8 \text{ W/m}^2$ .

# Ślady statków w chmurach



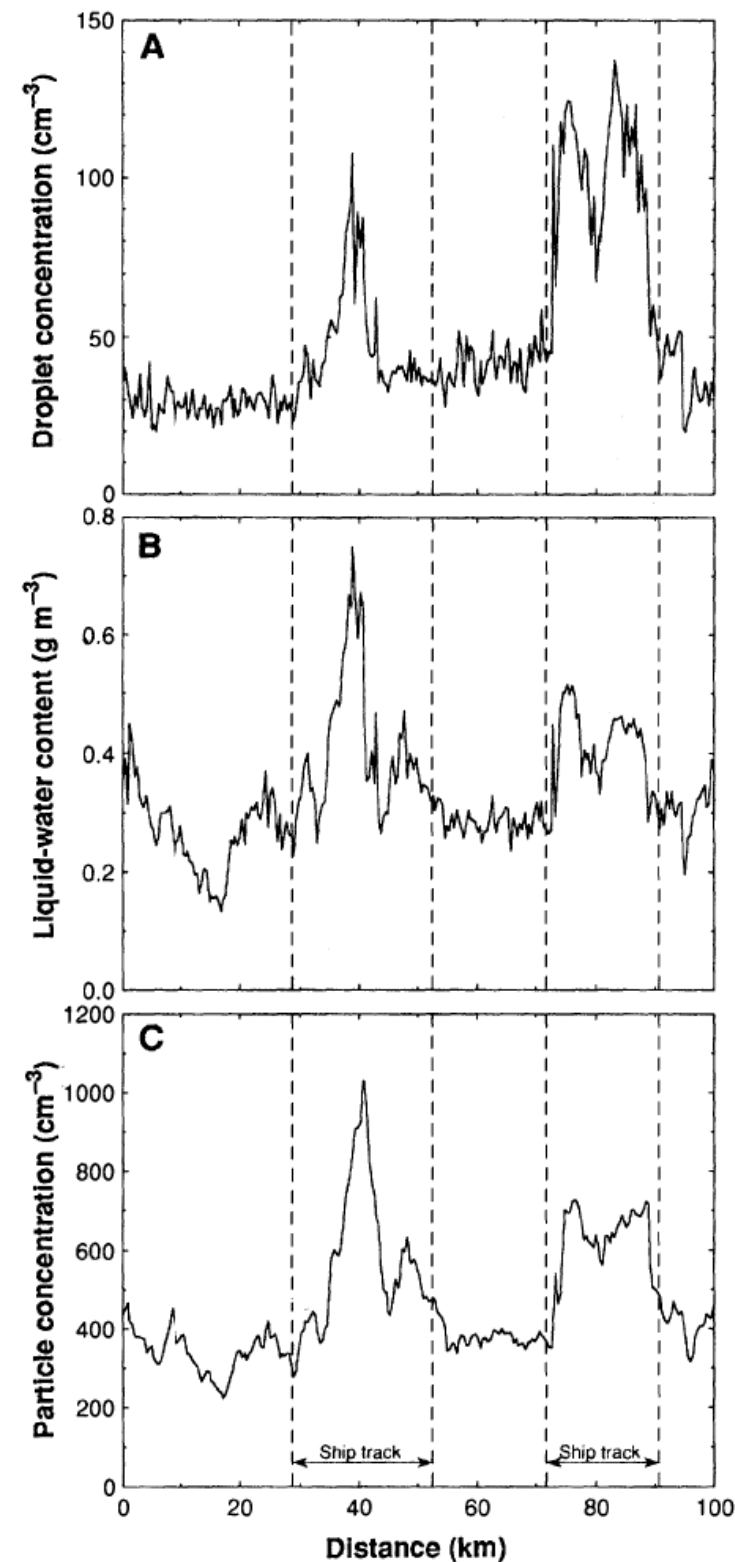
W sprzyjających okolicznościach (mało centrów kondensacji) chmury mogą tworzyć się na cząstkach dymu z silników okrętowych. Zdjęci z czujników AVHRR satelity meteorologicznego NOAA-9. Na zdjęciach obszar 500 km razy 500 km w pasmach 0.63  $\mu\text{m}$ , 3.7  $\mu\text{m}$  oraz 11  $\mu\text{m}$ . Ze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

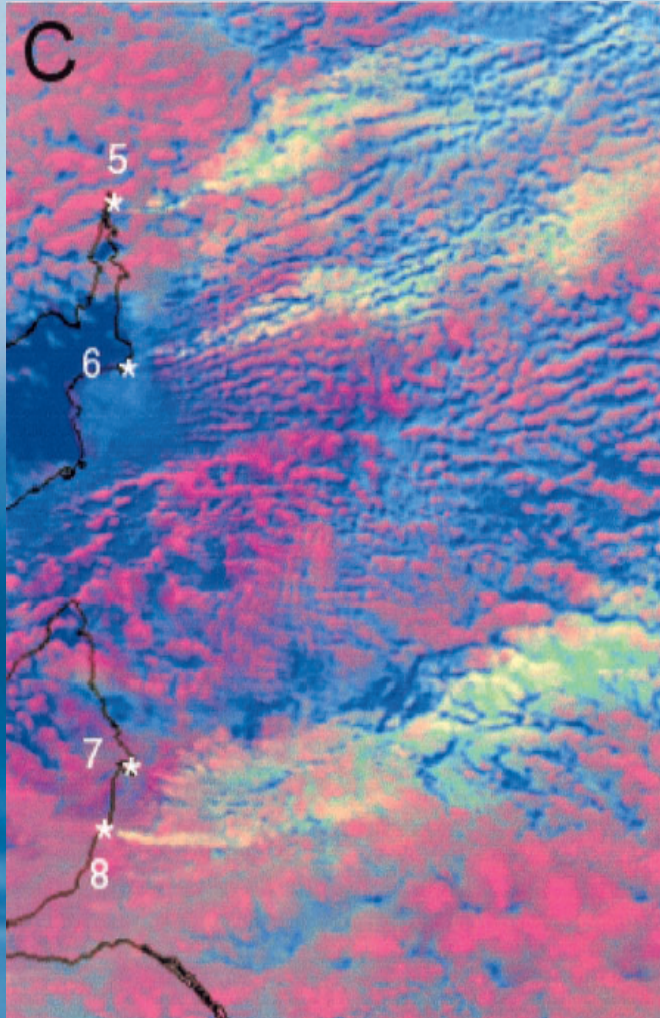
Przeloty samolotem badawczym przez pasma chmur pochodzenia okrętowego wykazały zwiększoną ilość kropeł, zawartość wody i ilość cząstek aerozolu (w całym profilu pionowym).

Ponieważ zmniejszenie wielkości kropeł 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**.

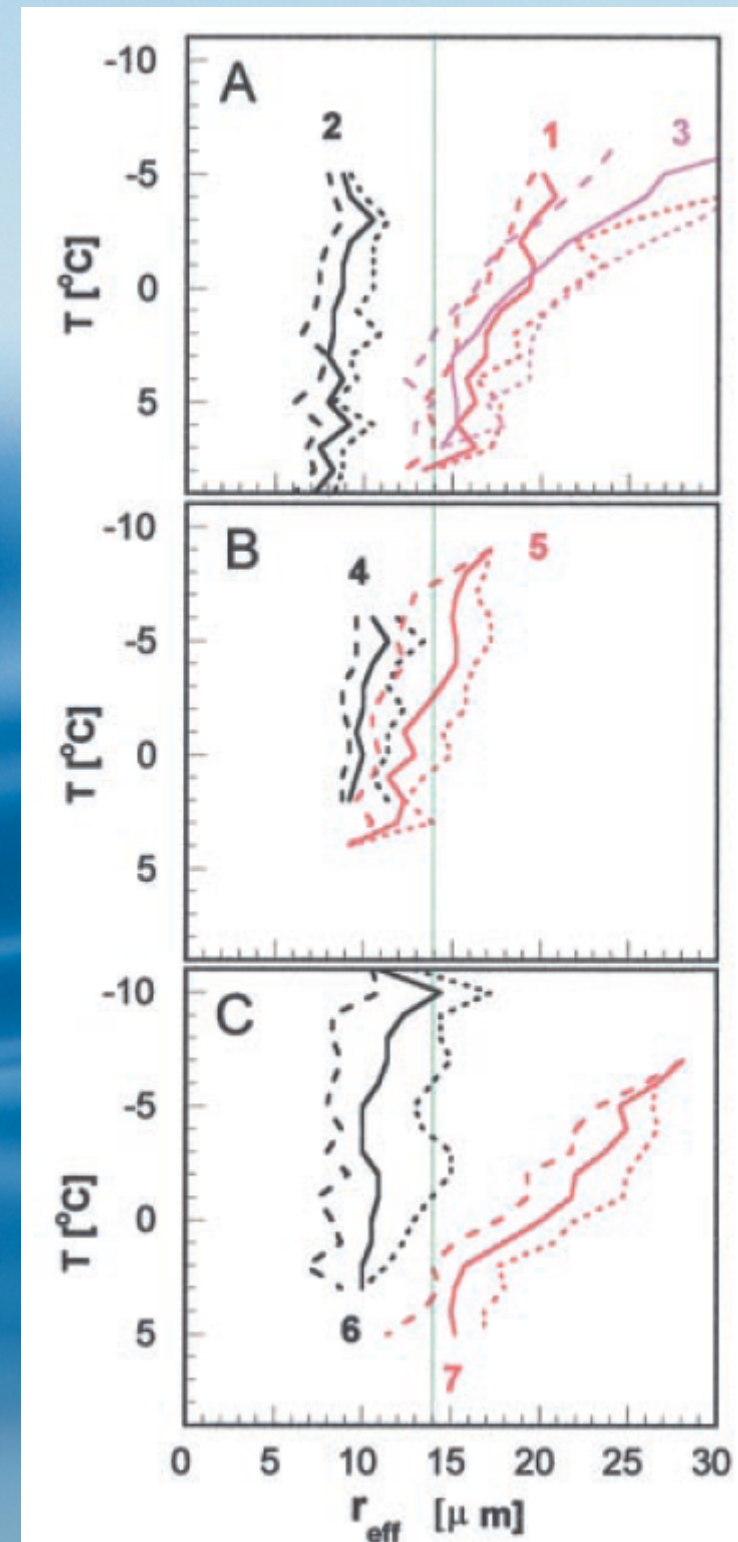


## 2-gi pośredni efekt nad lądem



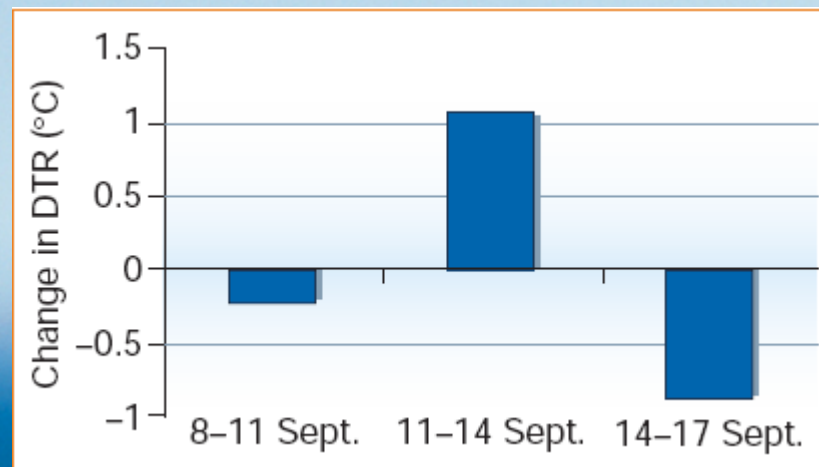
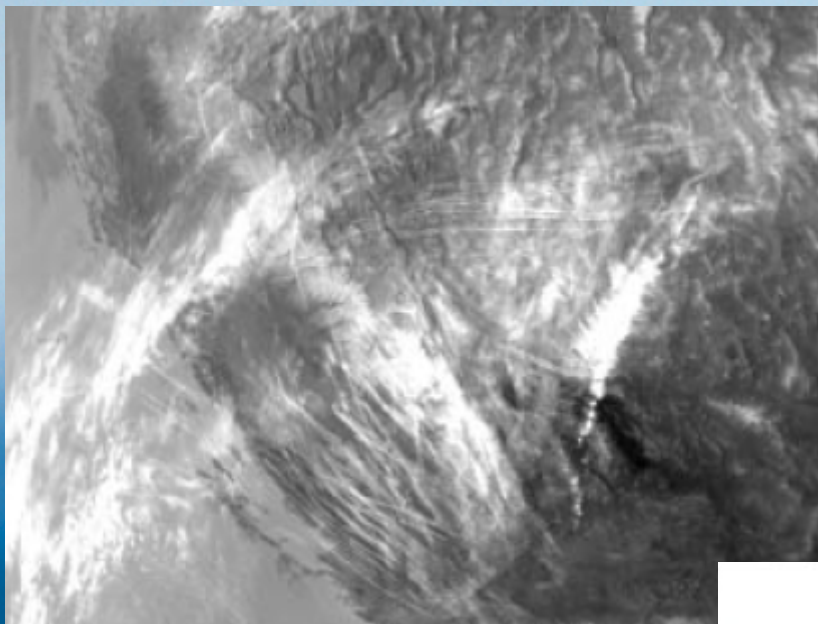
Pasma chmur z drobnymi kroplami (białe) za zakładami przemysłowymi Południowej Australii (po lewej) oraz profile efektywnego promienia kropel dla **czystych** i **zadymionych** obszarów (po prawej - temperatura jest tu miarą wysokości). Deszcz powstaje z kropli o promieniu  $>14 \mu\text{m}$  (pionowa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



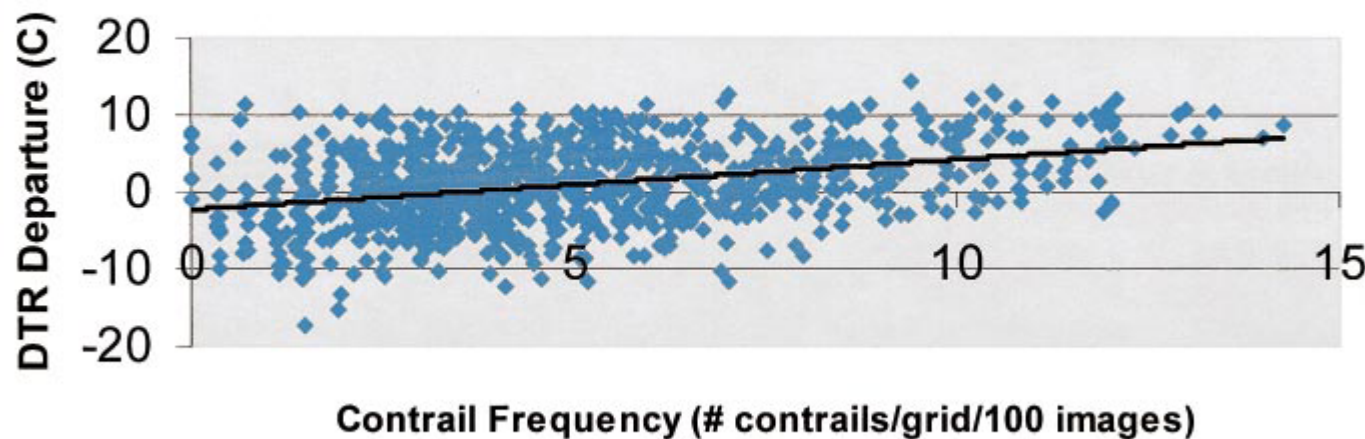
*Rosenfeld 2000 (Science)*

# Samoloty też zostawiają ślady ("jet contrails")

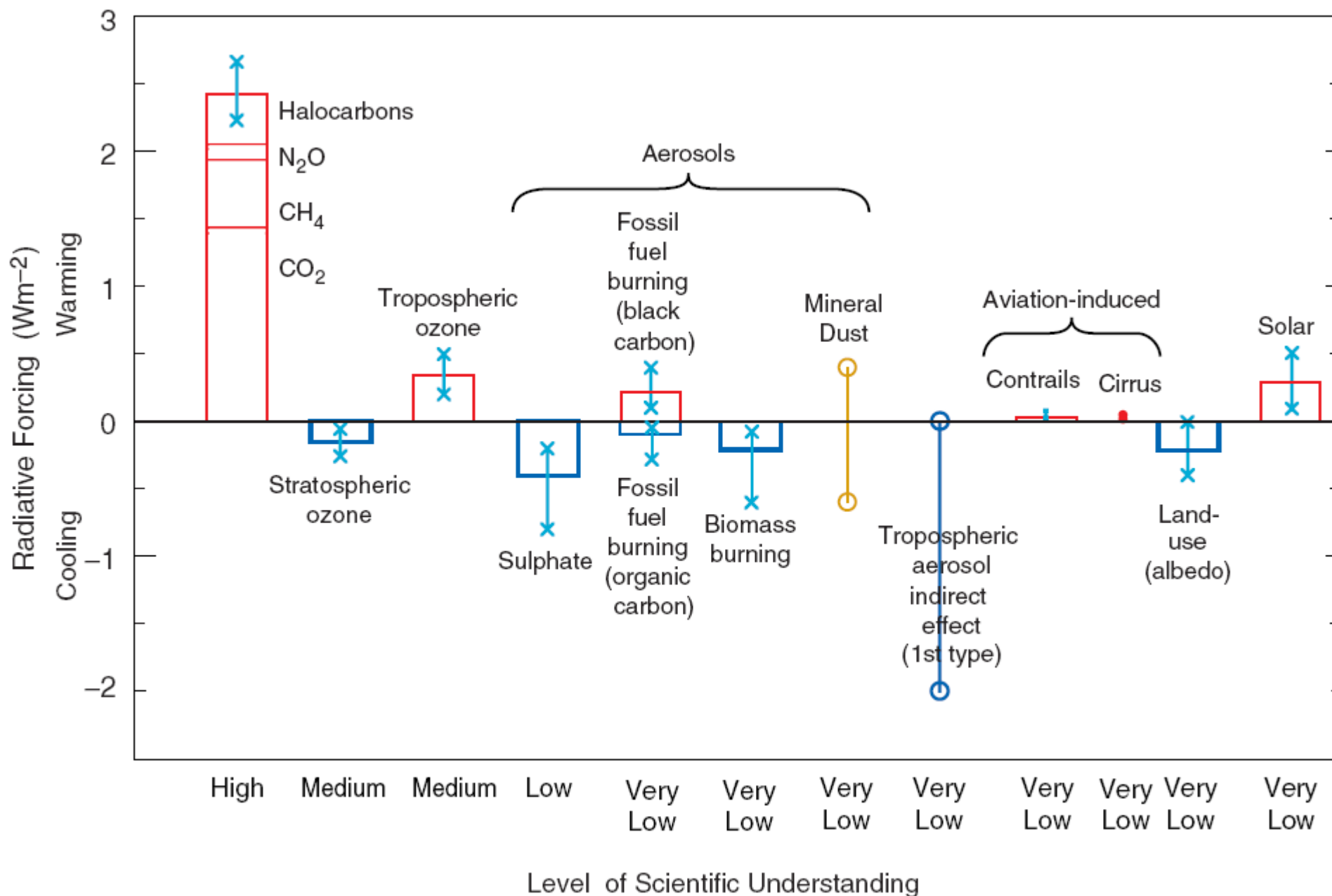


Różnica temperatur dzień-noc (DTR) spadła w okresie 3 dni po 11.9.2001, gdy w USA nie latały samoloty pasażerskie o średnio 1.8 stopnia. Przyczyną są ślady po odrzutowcach (*contrails*), których ilość w danym rejonie koreluje ze zmianą DTR 12-14 września 2001.

Relationship Between DTR Departures and Mean Contrail Frequency ( $R=0.36$ ;  $p<0.01$ )



# Raport IPCC: stan wiedzy na rok 2001



## Podsumowanie 1/3

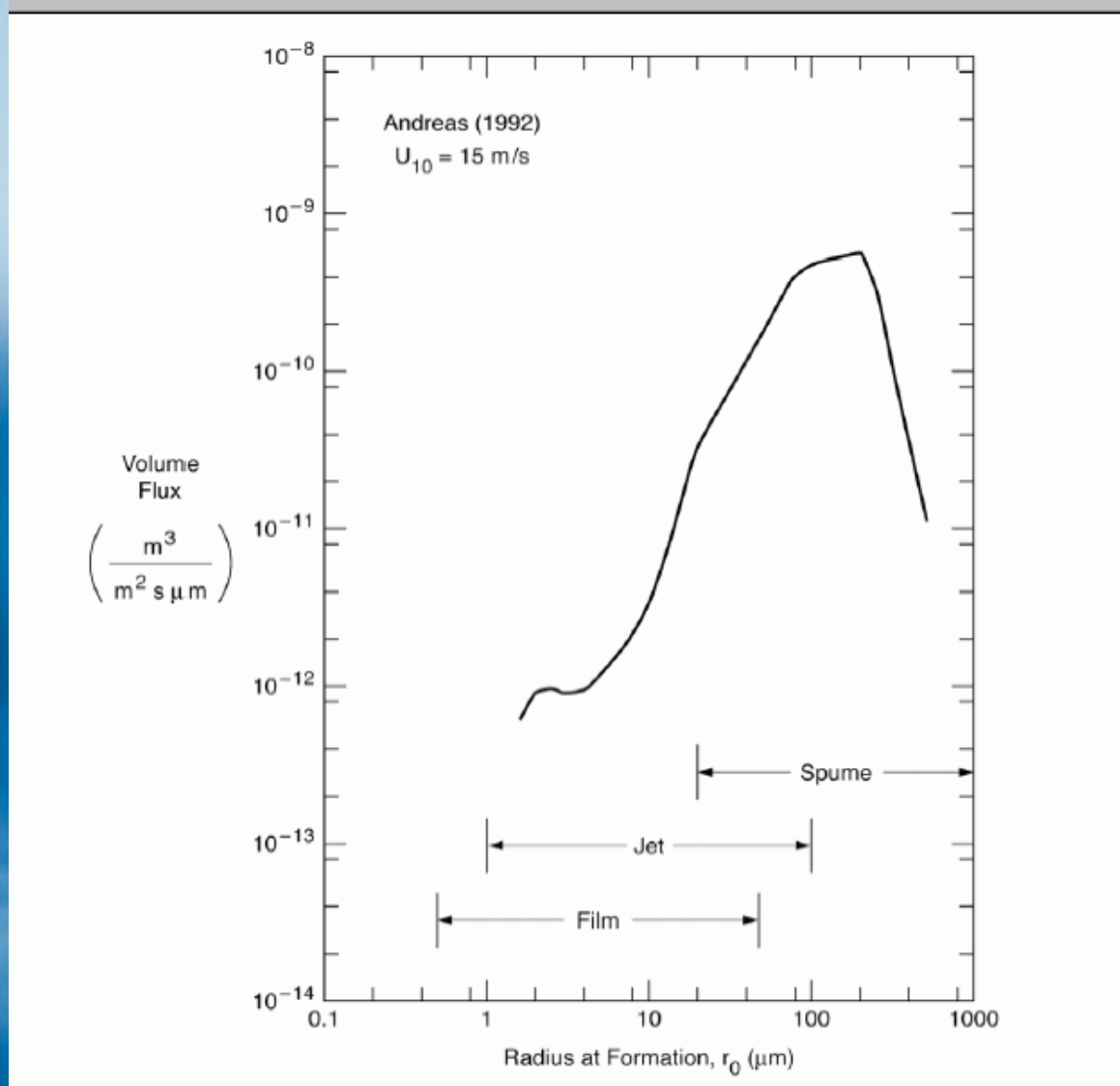
Aerozol pełni istotną rolę klimatyczną:

- 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 kropeł, powodując przez to większą grubość optyczną chmury (większe odbicie dodatkowo chłodzące powierzchnię ziemi). Jest to tzw. „pierwszy pośredni” efekt aerozolu.
- Zmniejszając wielkość kropeł 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 – chociaż na konferencjach aerozolowych przeważają aerozole przemysłowe i medyczne.*

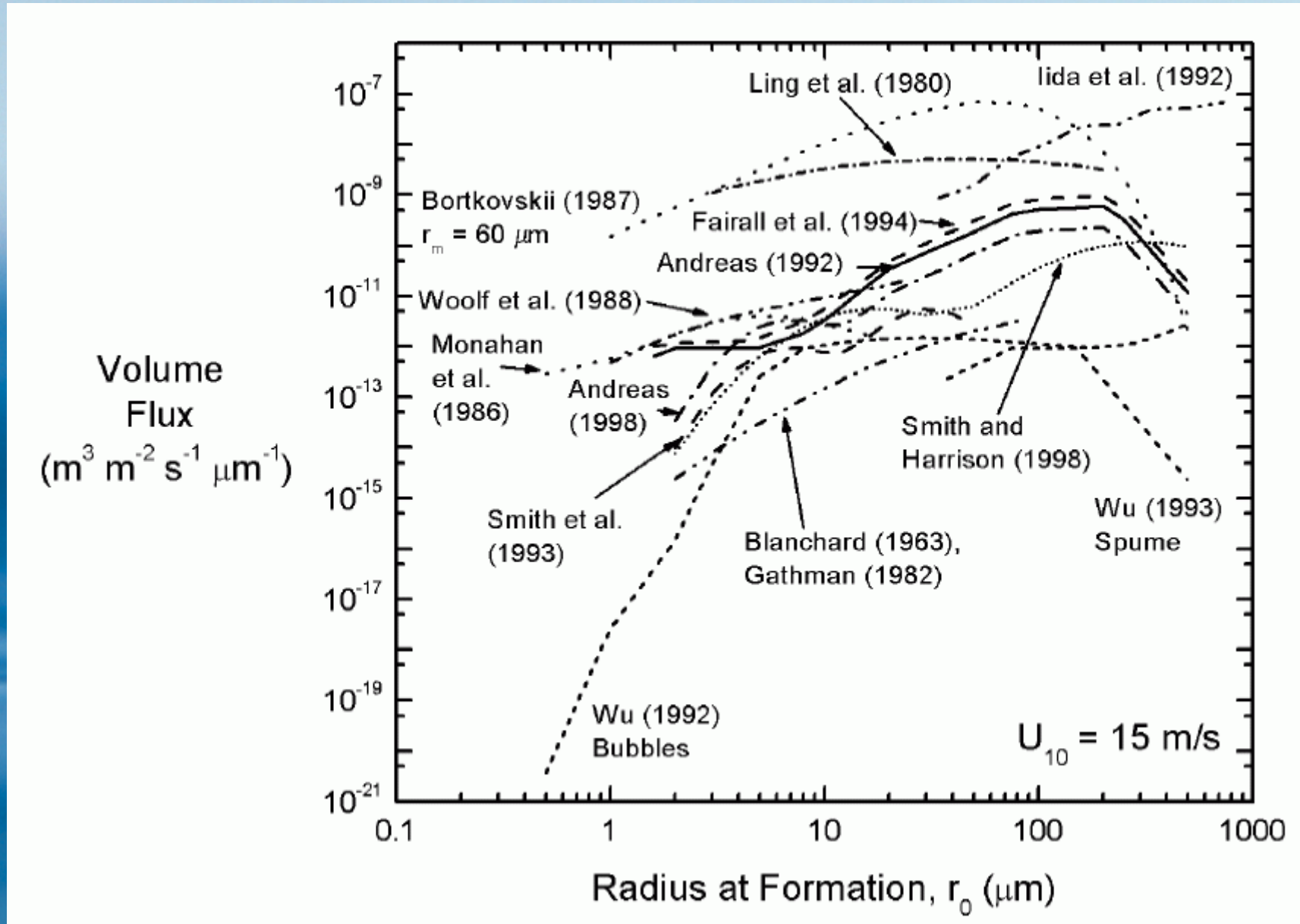
# Mechanizmy generacji aerozolu morskiego



Prze prędkościami 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*

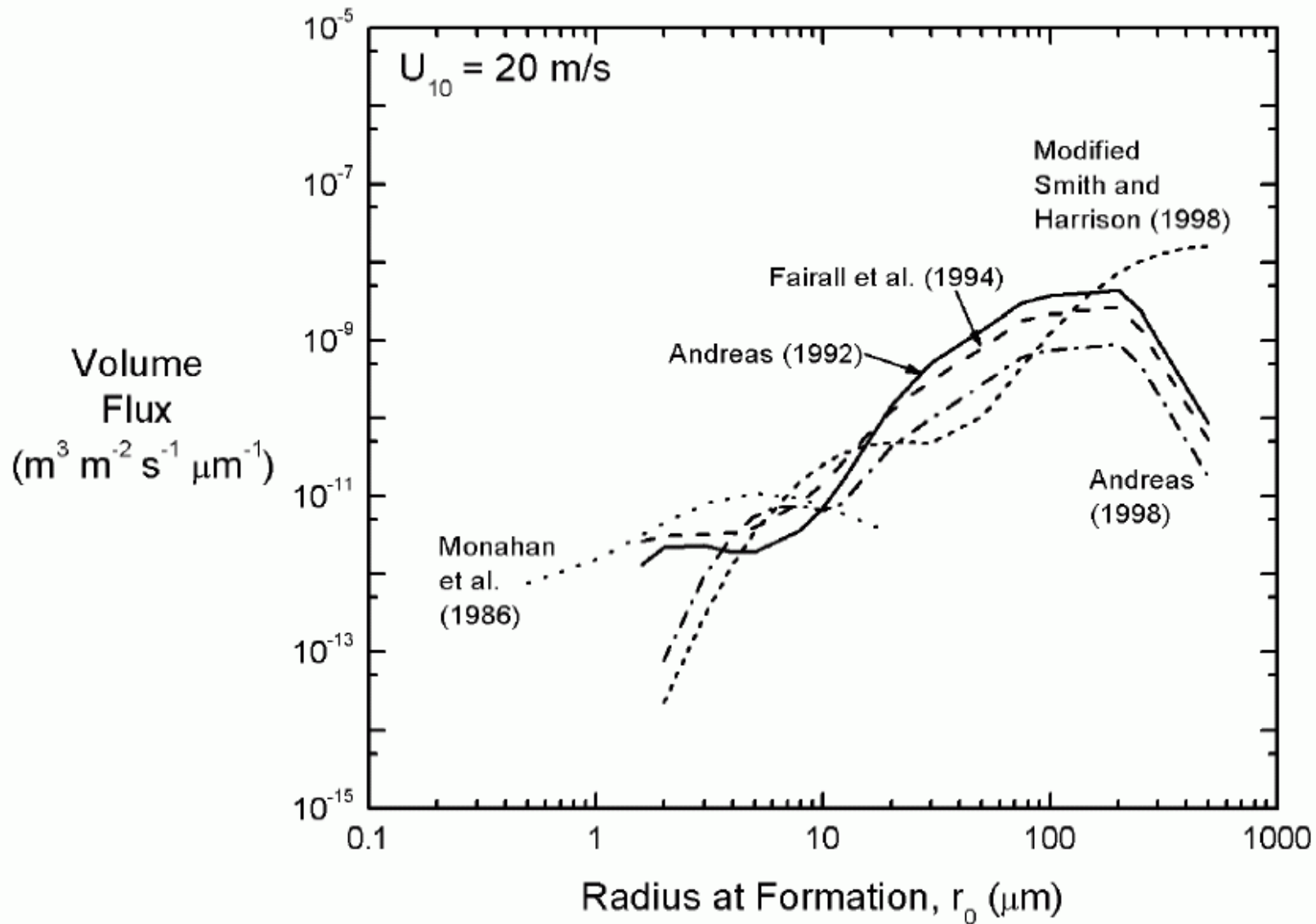
# Zakres zmienności postulowanych funkcji strumieni aerozolu



Rozbieżności w szacunku generacji aerozolu morskiego sięgają 6 rzędów

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

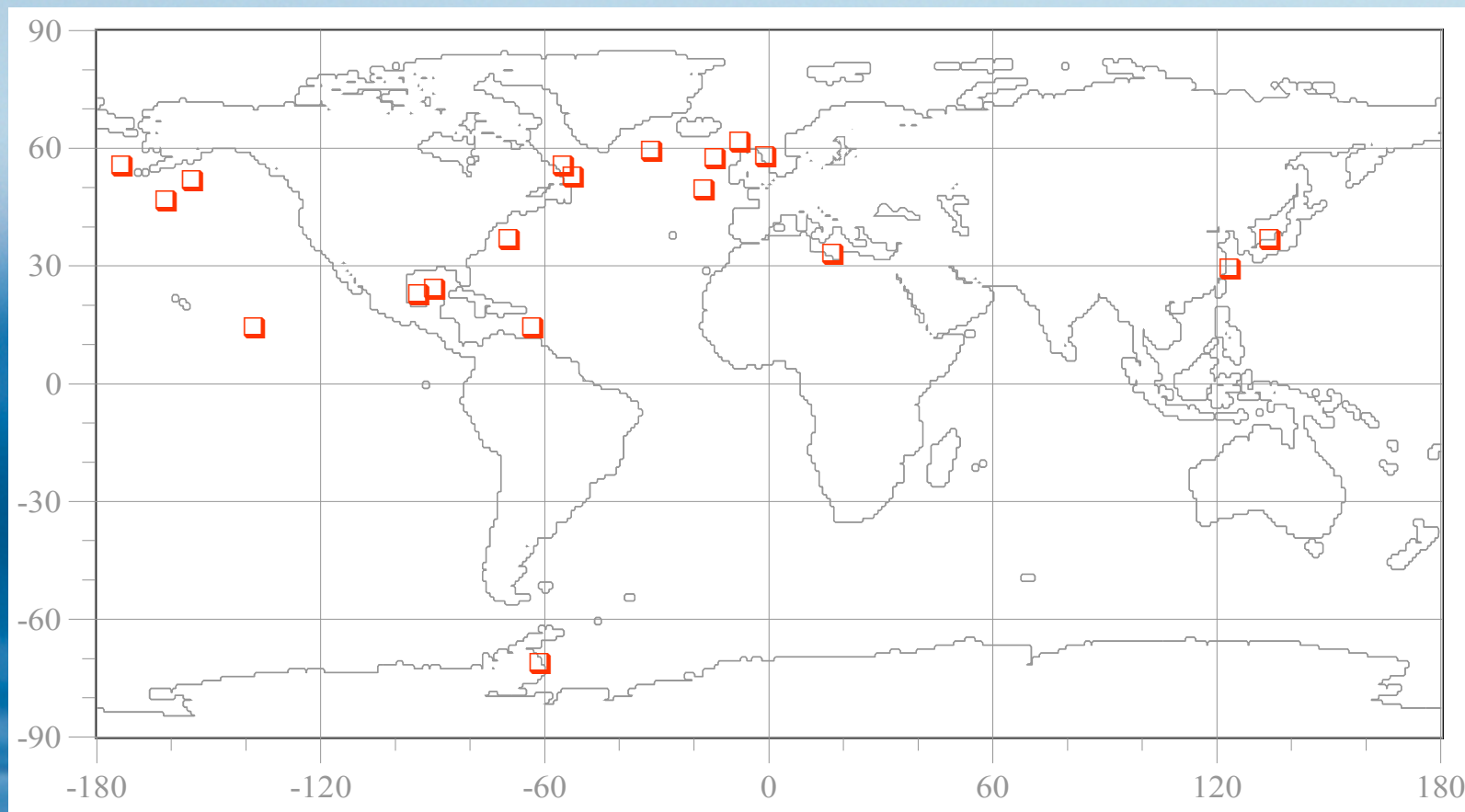
# Produkcja aerozolu: proporcjonalna do sześciangu prędkości wiatru?



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*

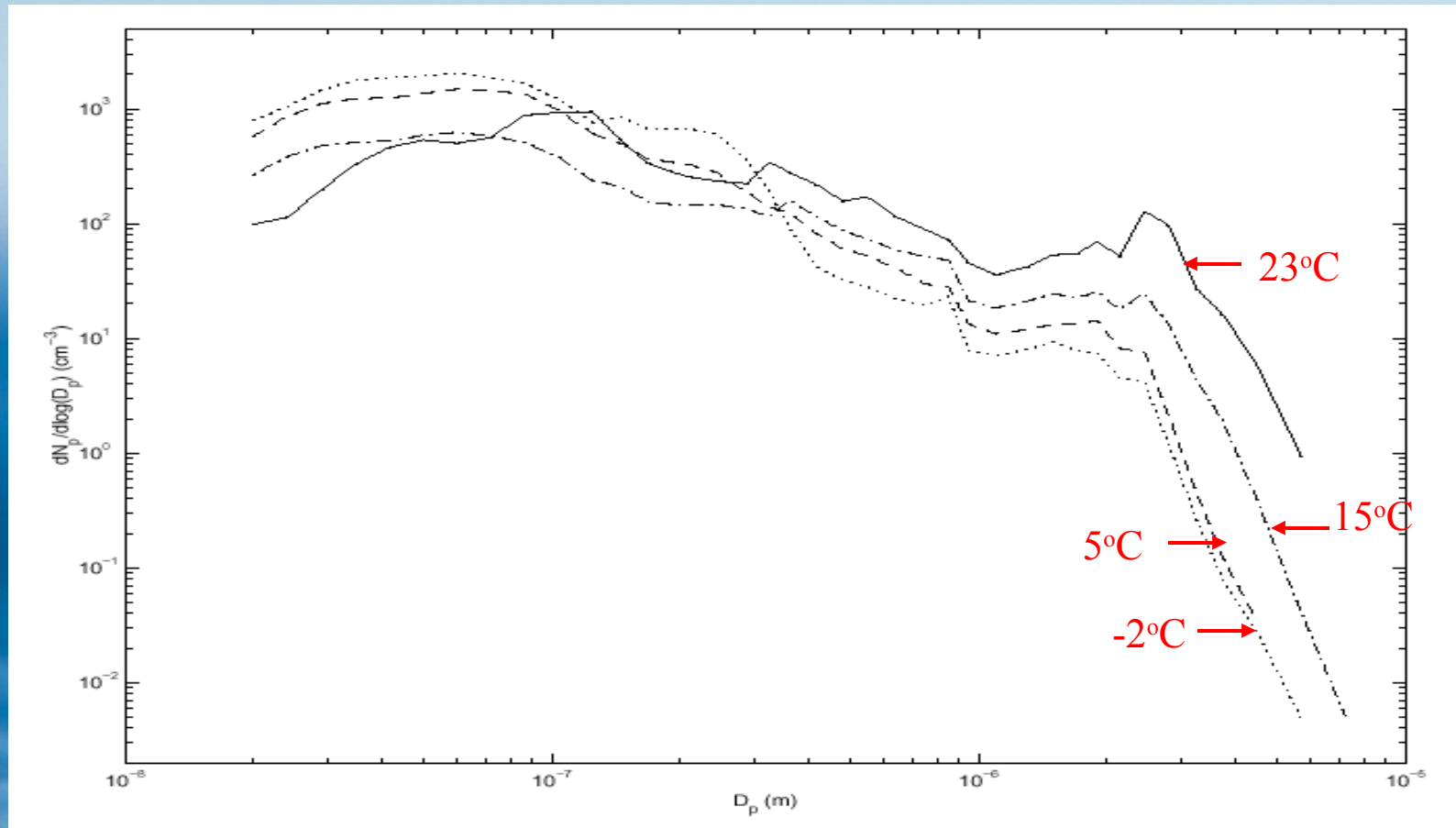
## Czy w ogóle mamy dane z pełnego oceanu?



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.

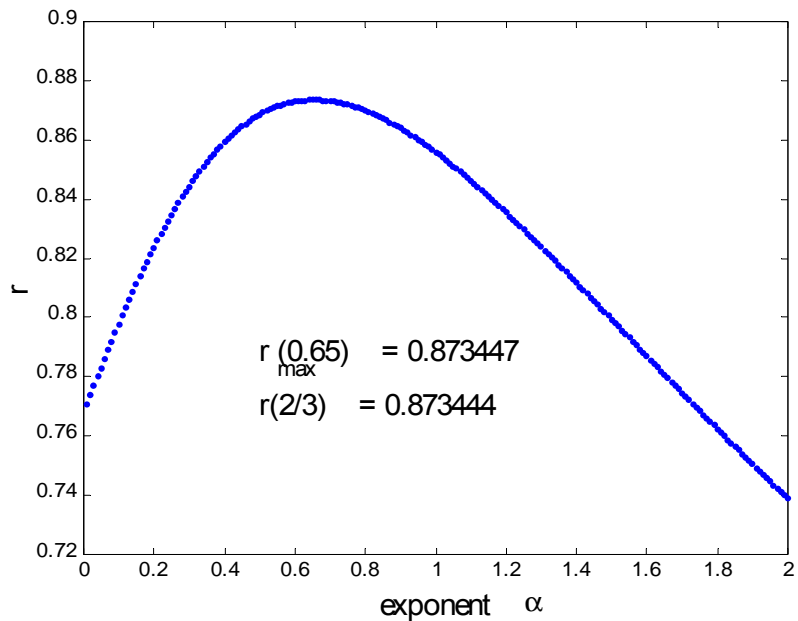
*Anguelova et al. (NRL) "Effects of Environmental Variables in Sea Spray Generation Function via Whitecap Coverage", Skipton, 2004*

# 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?

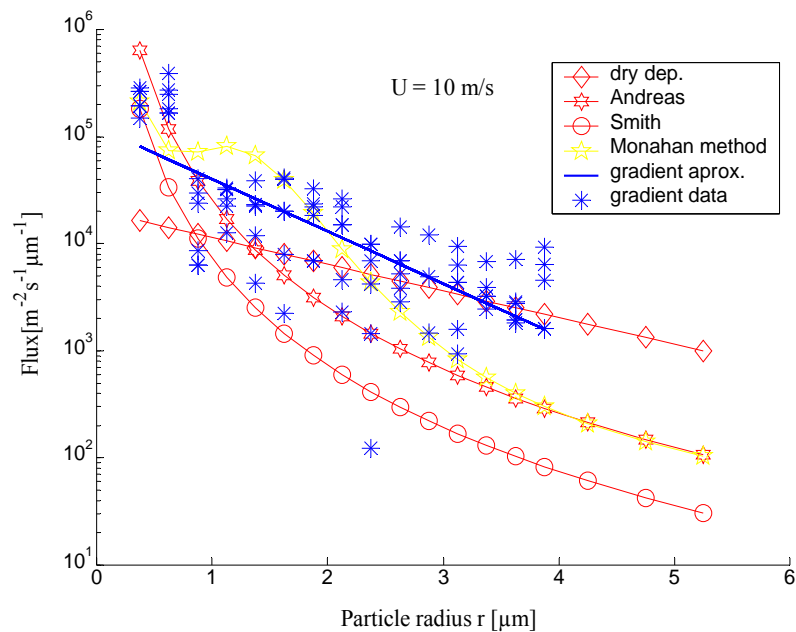
# Badania funkcji produkcji aerozolu w IOPAN



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  $U^3$ )

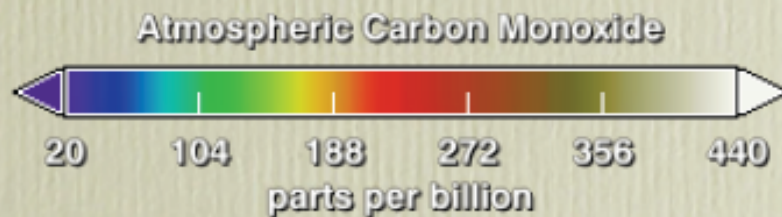
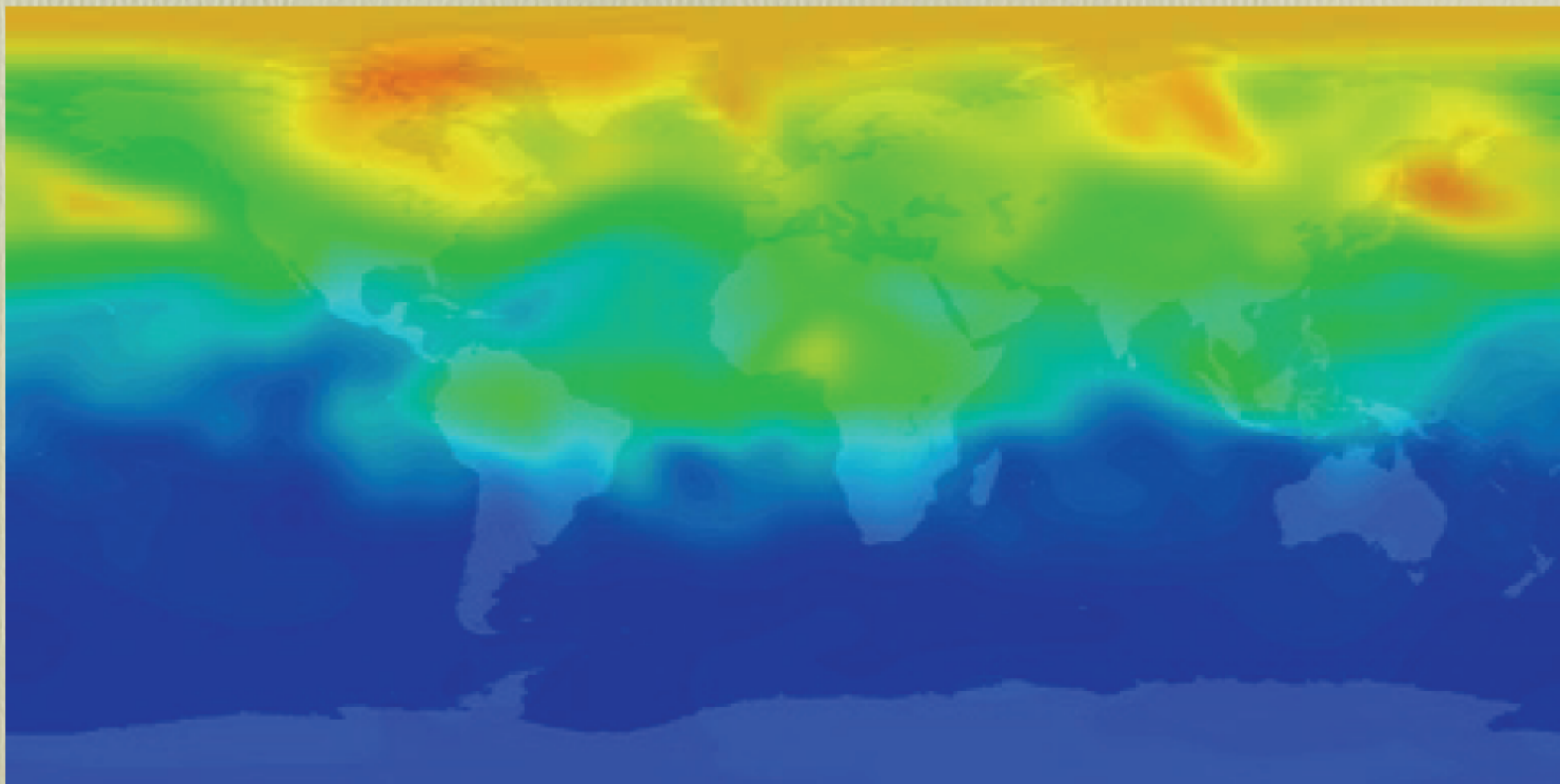
b) najczęściej używane funkcje w literaturze są kilkakrotnie zaniżone przy wiatrach  $< 12$  m/s



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



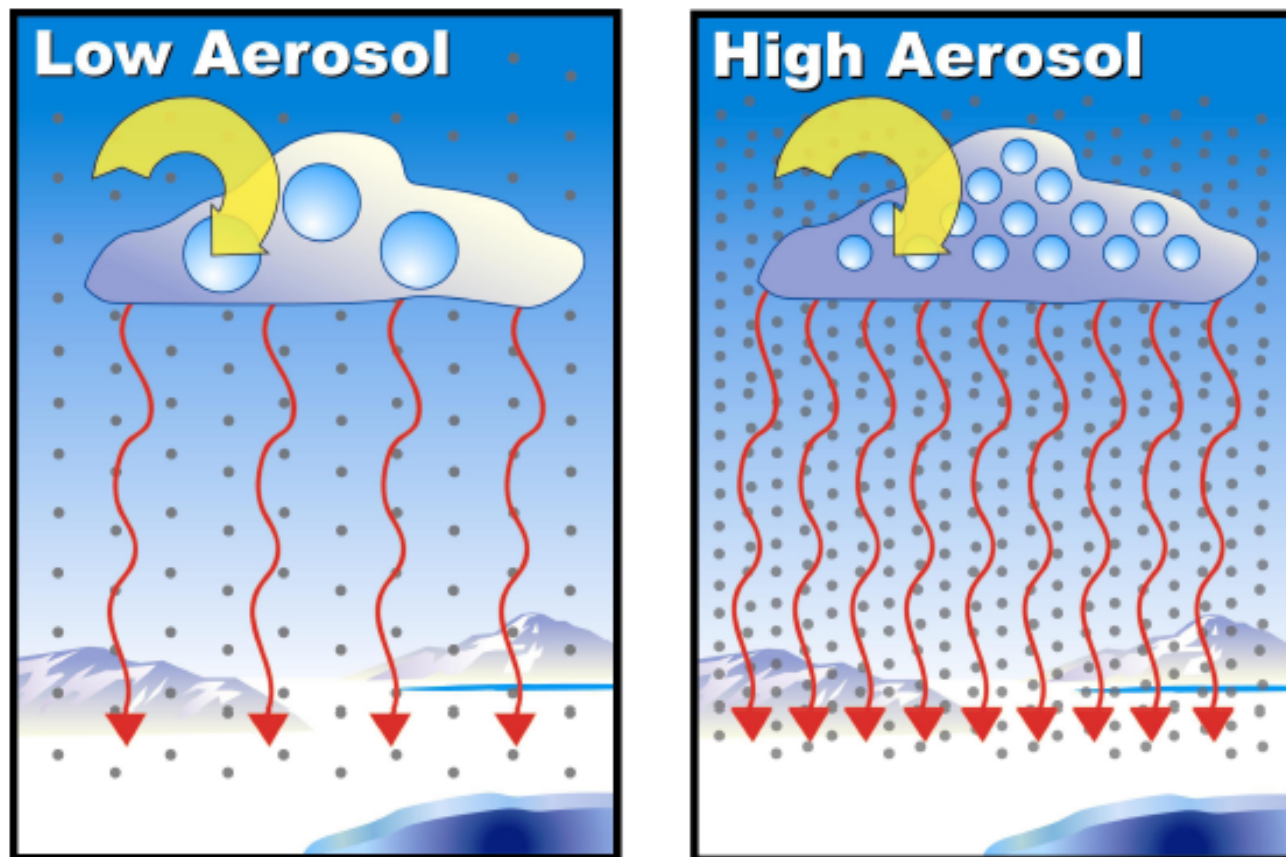
# MOPITT CO, Mar-Dec 2000, ~5 km



NASA GSFC

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

*An indirect effect on the atmospheric radiation budget*

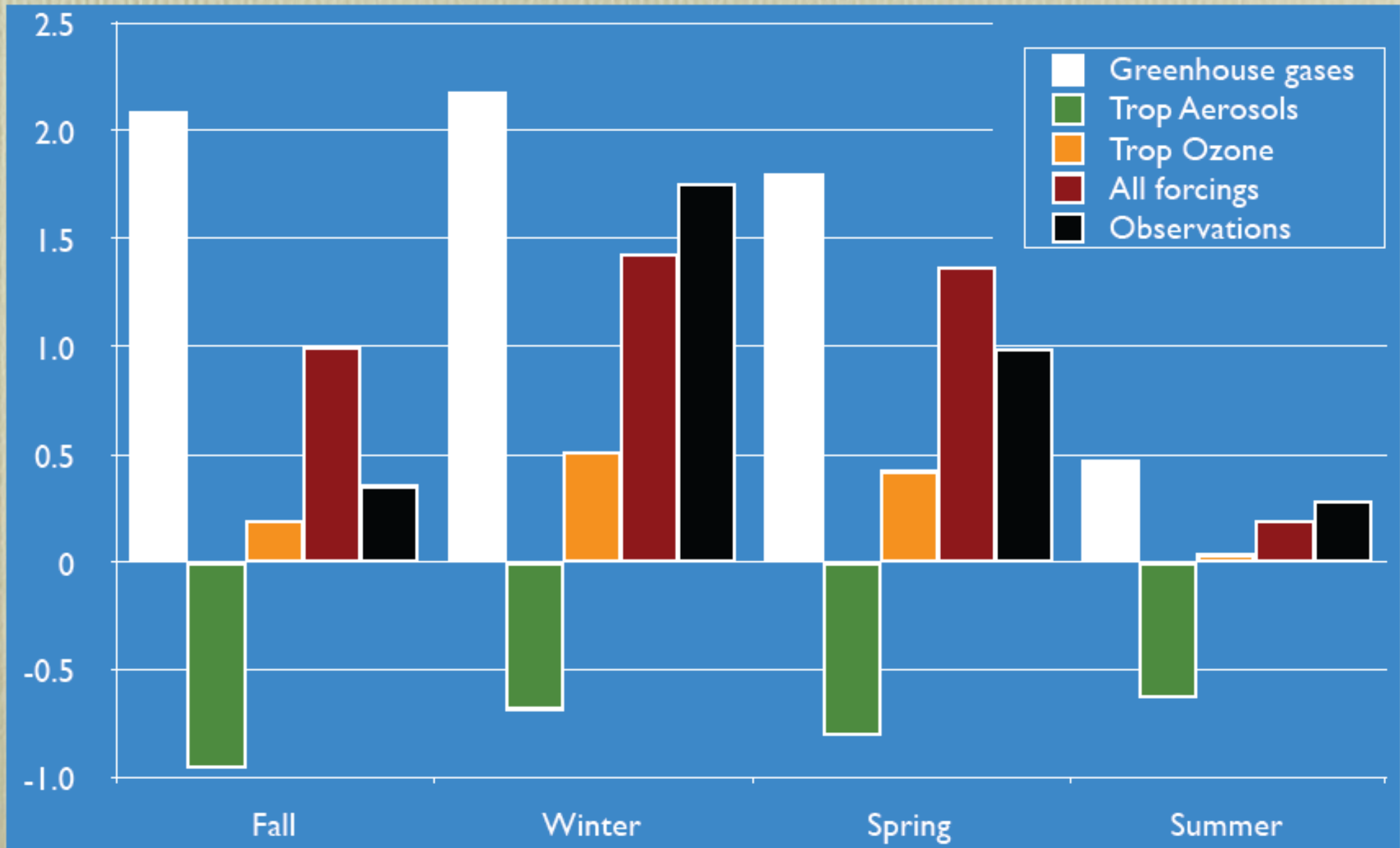


Aerosols serve as cloud condensation nuclei (CCN):

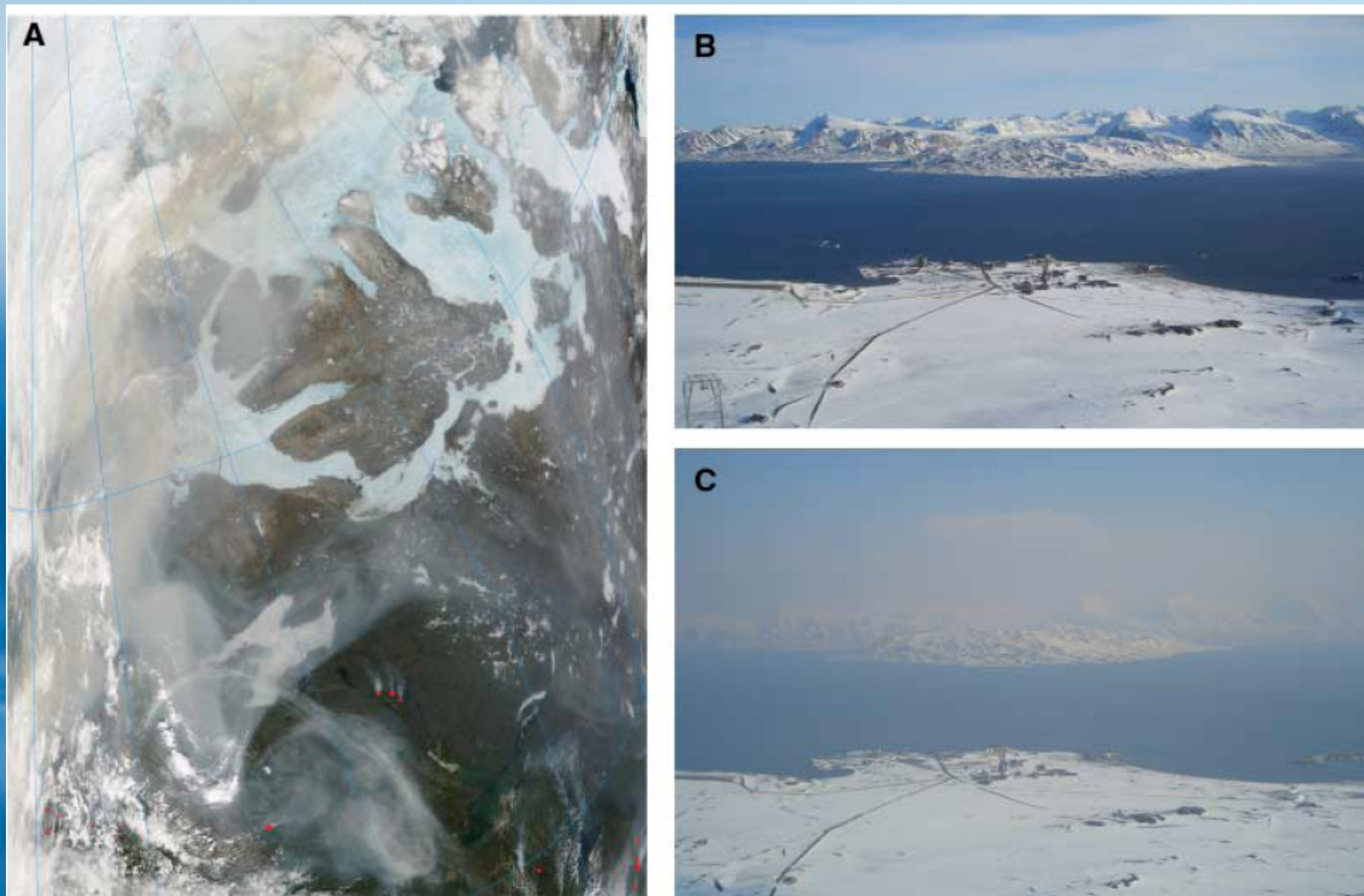
More CCN → more and smaller cloud droplets → greater cloud *emissivity*

→ cloud radiates more energy to Earth surface → enhances surface warming

# Trends from GISS IPCC AR4 Simulations vs Observations



## Arktyczna mgiełka (*Arctic Haze*)



A. Pożary lasów w Kanadzie eksportują aerozol w głąb 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)*

## Udział IOPAN

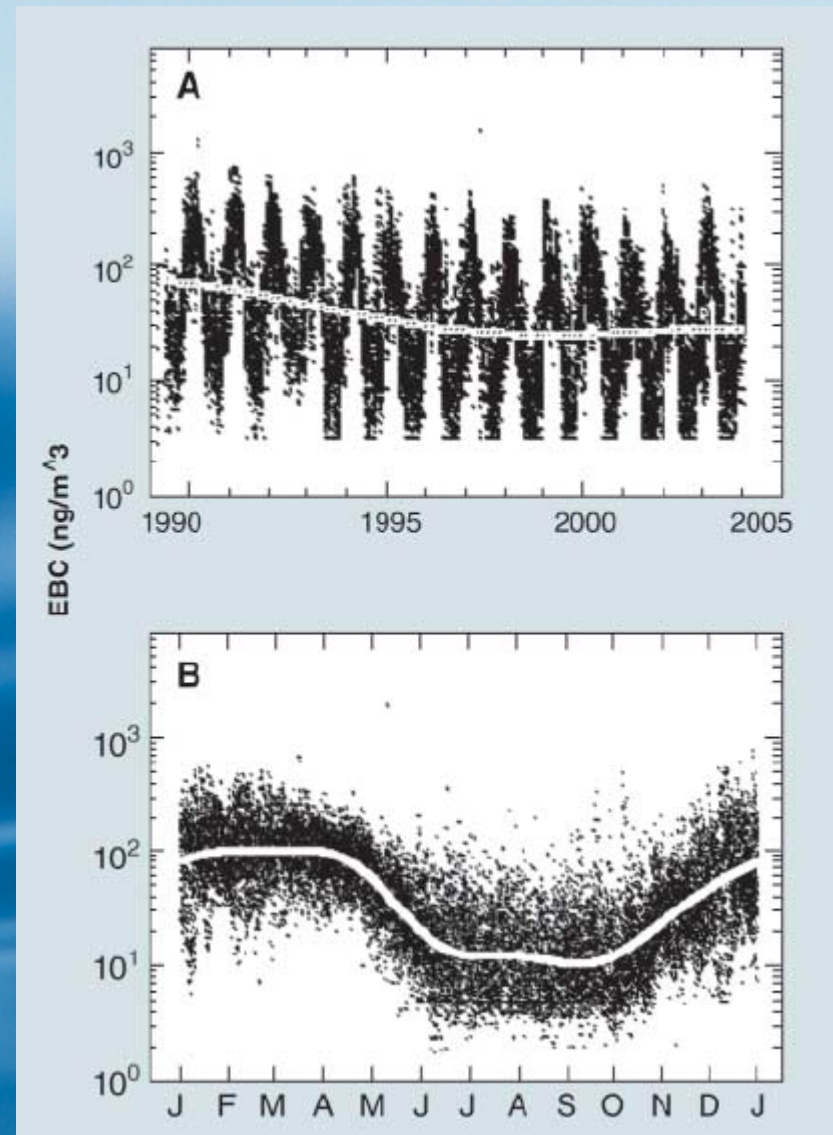


Tymon Zieliński i Tomek Petelski mierzą grubość optyczną atmosfery ręcznymi miernikami Microtops, NY Alesund, 21.03-7.04 2006 r.

## 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.

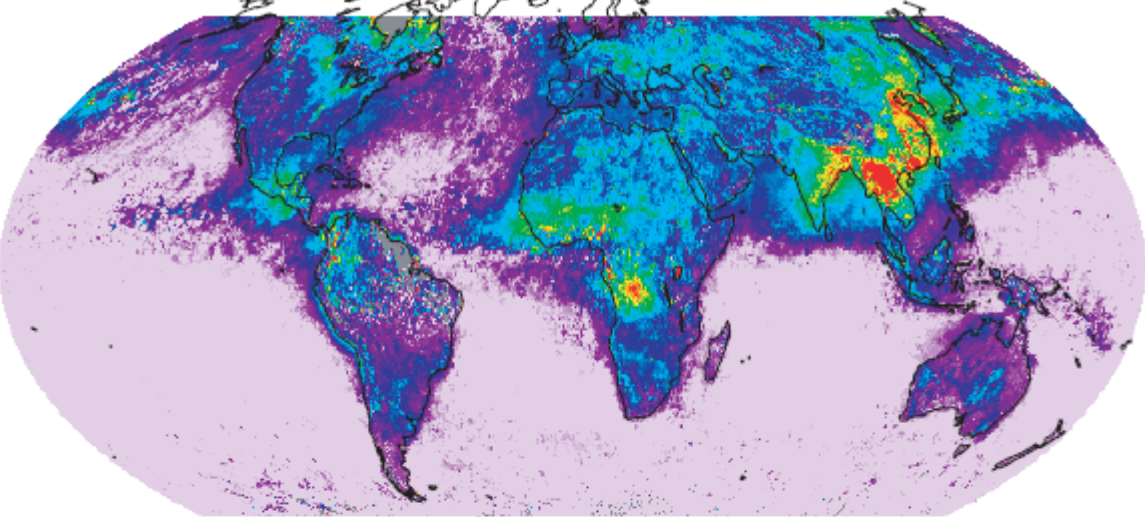
Aerozol arktyczny jest jednym z antropogenicznych czynników zmian klimatycznych. Dostarcza on do Arktyki cząstki węgla zwiększające albedo lodu. Arktyczna mgiełka wpływa na klimat Północy zmieniając oświetlenie, ogrzewając dolne warstwy atmosfery i prawdopodobnie wpływając na zachmurzenie Arktyki.



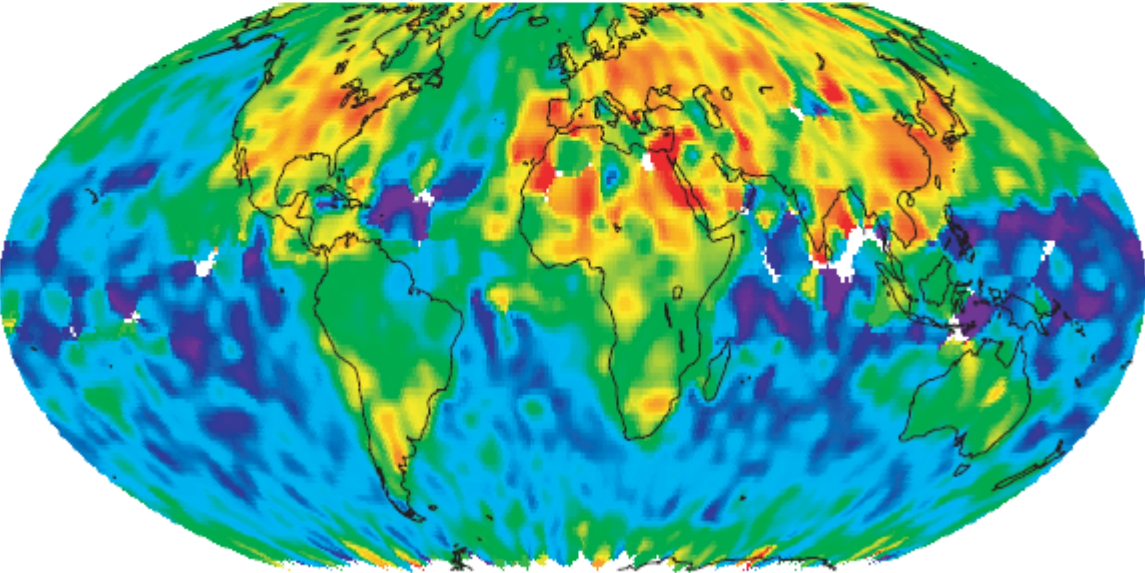
*Koncentracja cząstek węgla w aerozolu arktycznym w Alert (Kanada), Law & Stohl 2007 (Science)*

# Pierwszy pośredni efekt aerozolu naprawdę istnieje

Aerosol Index March–May 1997



Cloud Droplet Radius March–May 1997



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

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

# 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;

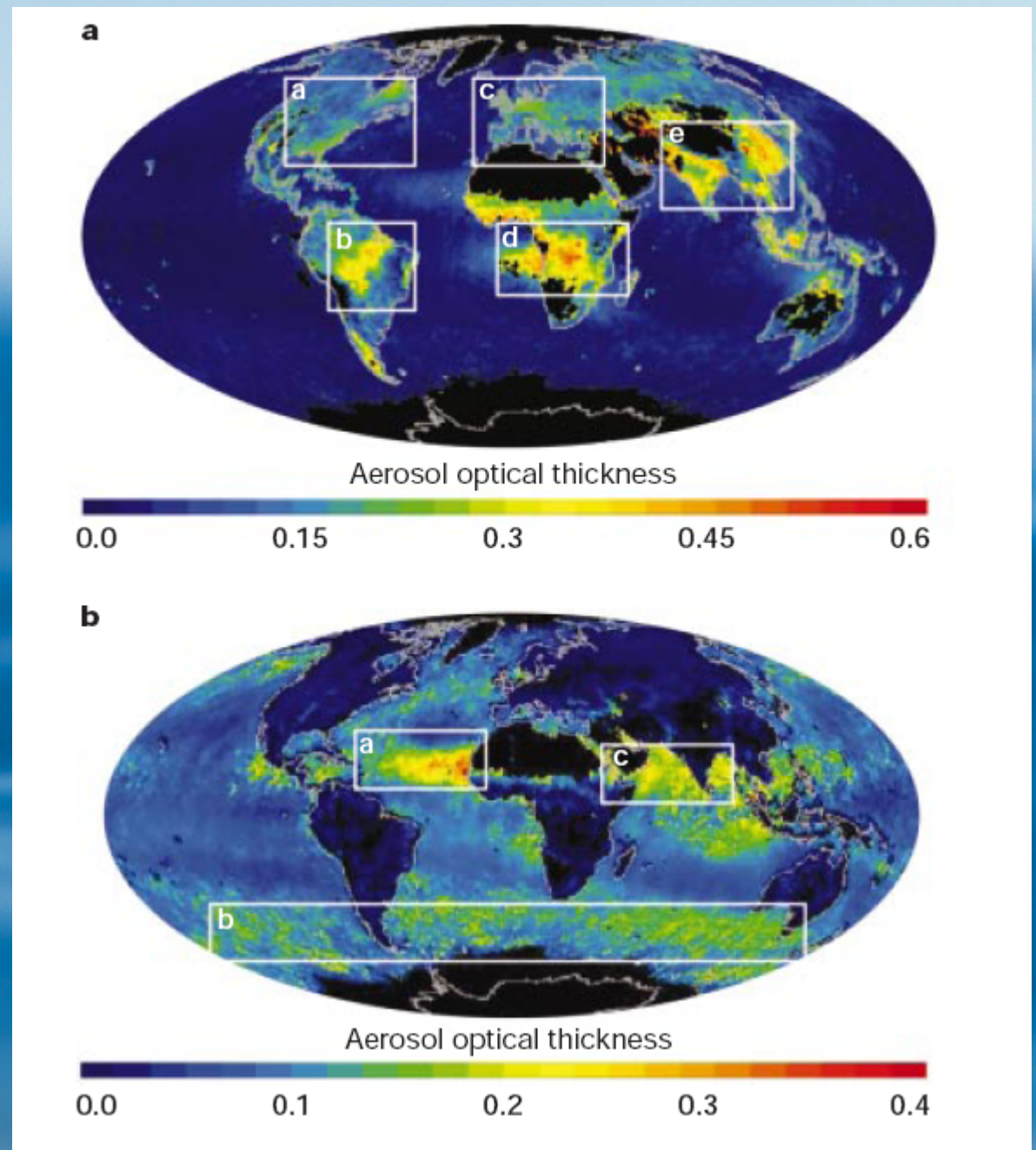
e - zanieczyszczenia antropogeniczne Południowej Azji

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

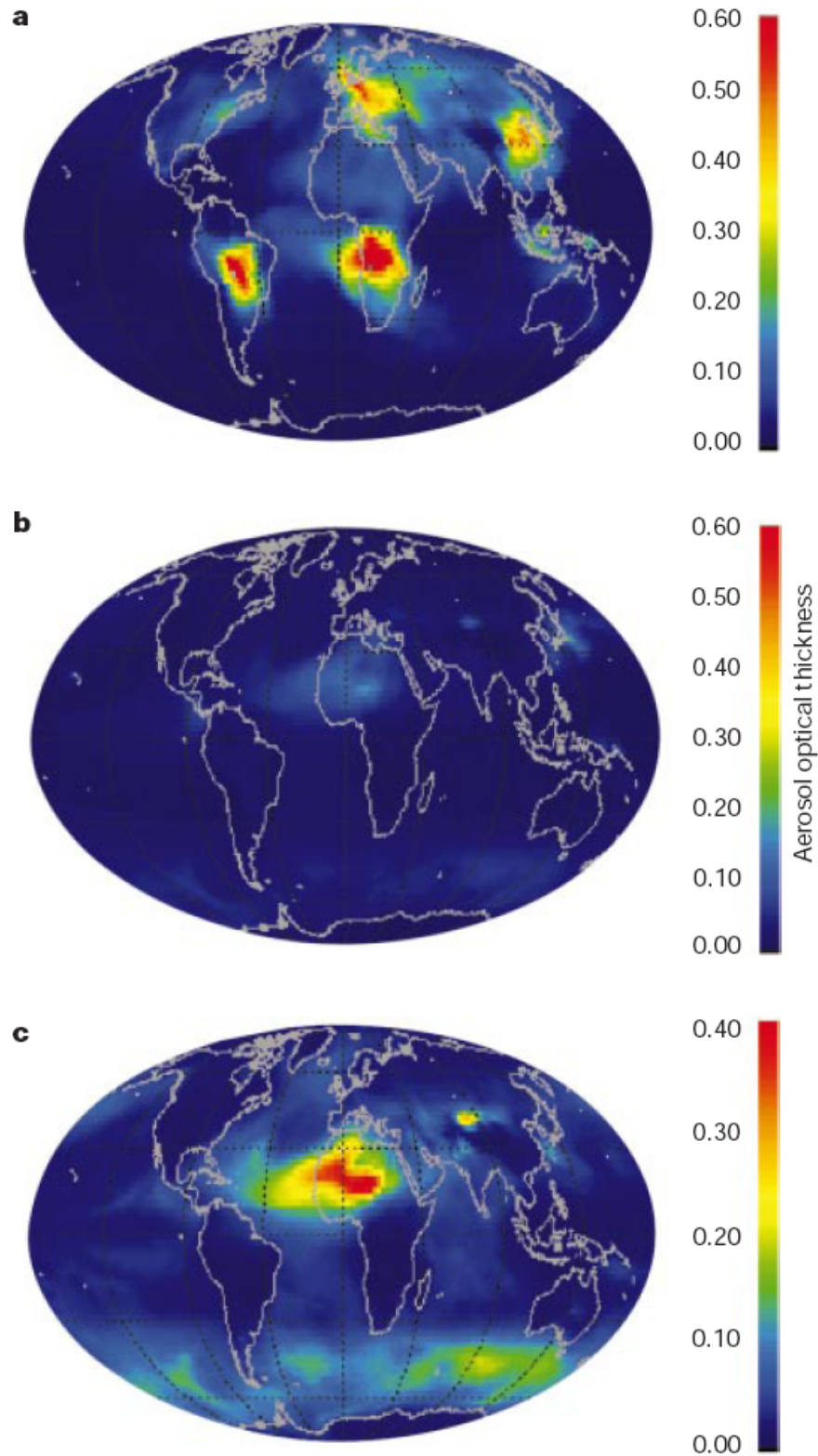
a - pył saharyjski,

b – sól morską,

c – pył pustynny



## Wyniki modelowania



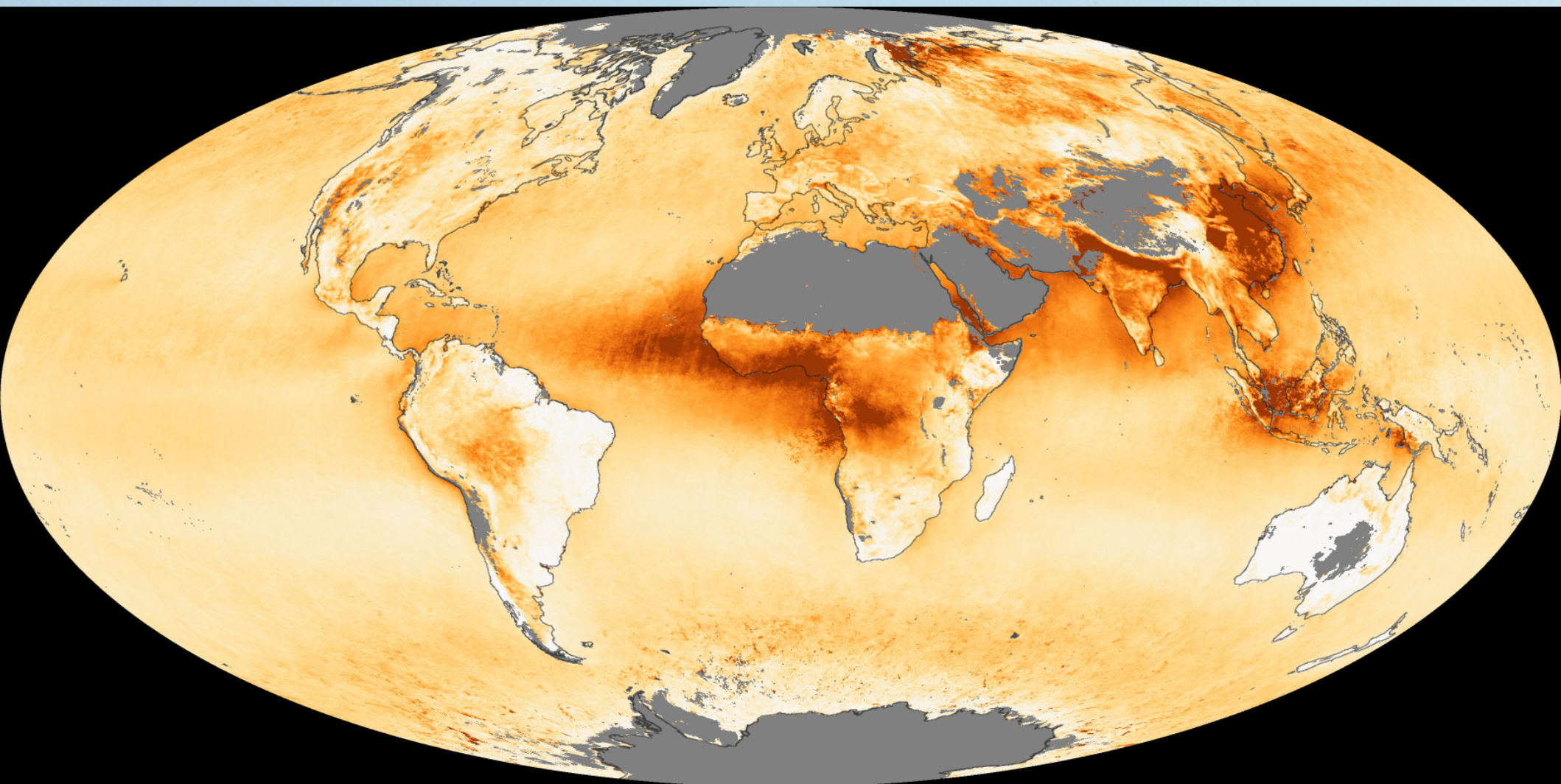
Model przenoszenia aerozolu (za Chin i inni 2002) daje wyniki porównywalne do MODIS dla tego samego miesiąca:

a) drobny aerozol antropogeniczny

b) naturalny drobny aerozol

c) naturalny aerozol "gruby" (pył i sól morską)

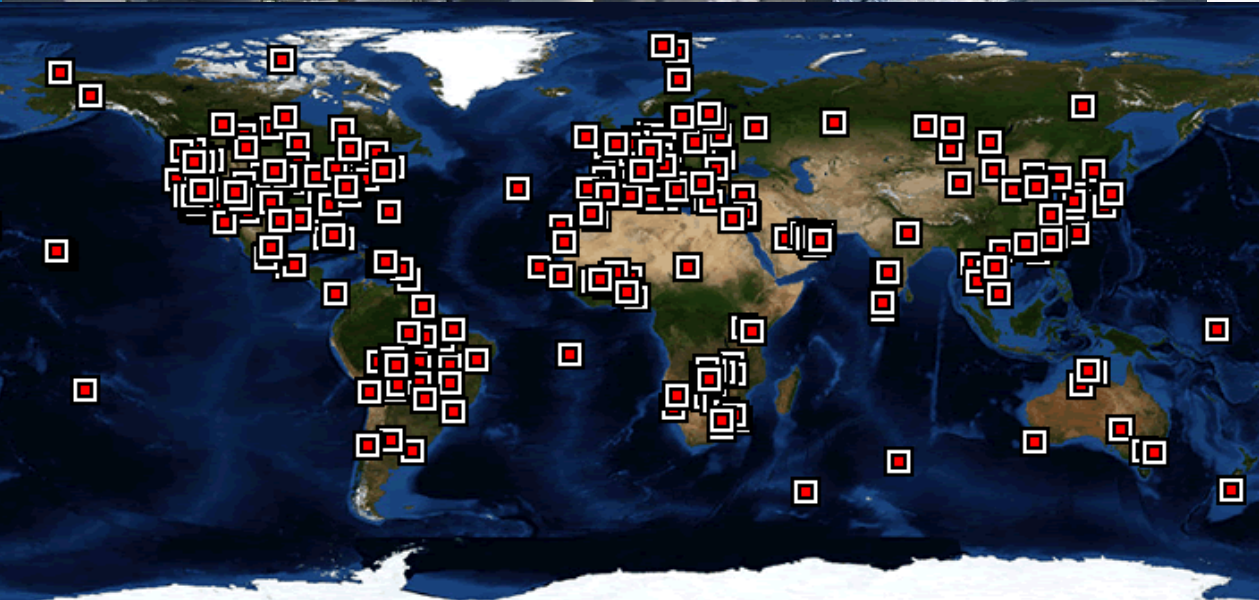
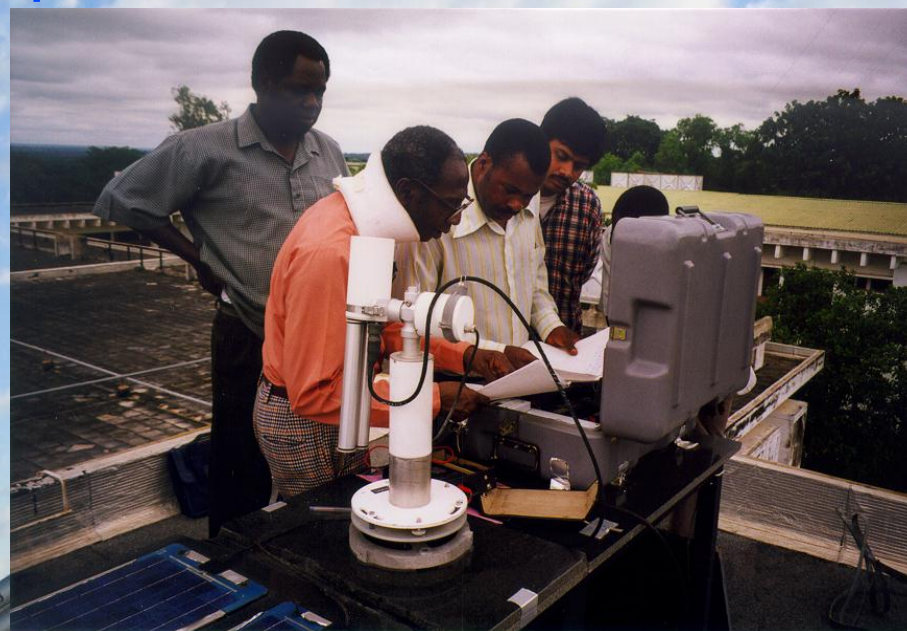
# Grubość optyczna aerozolu w 2006 roku



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

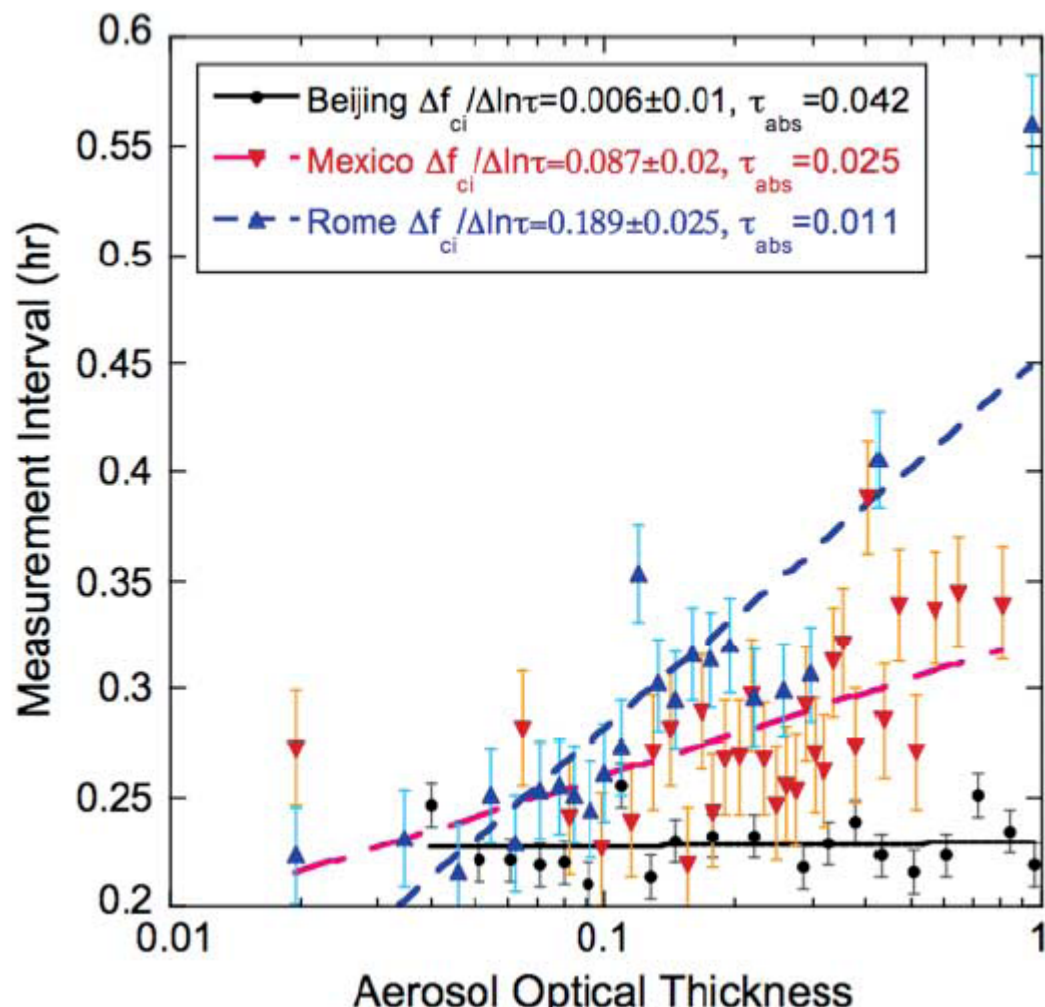
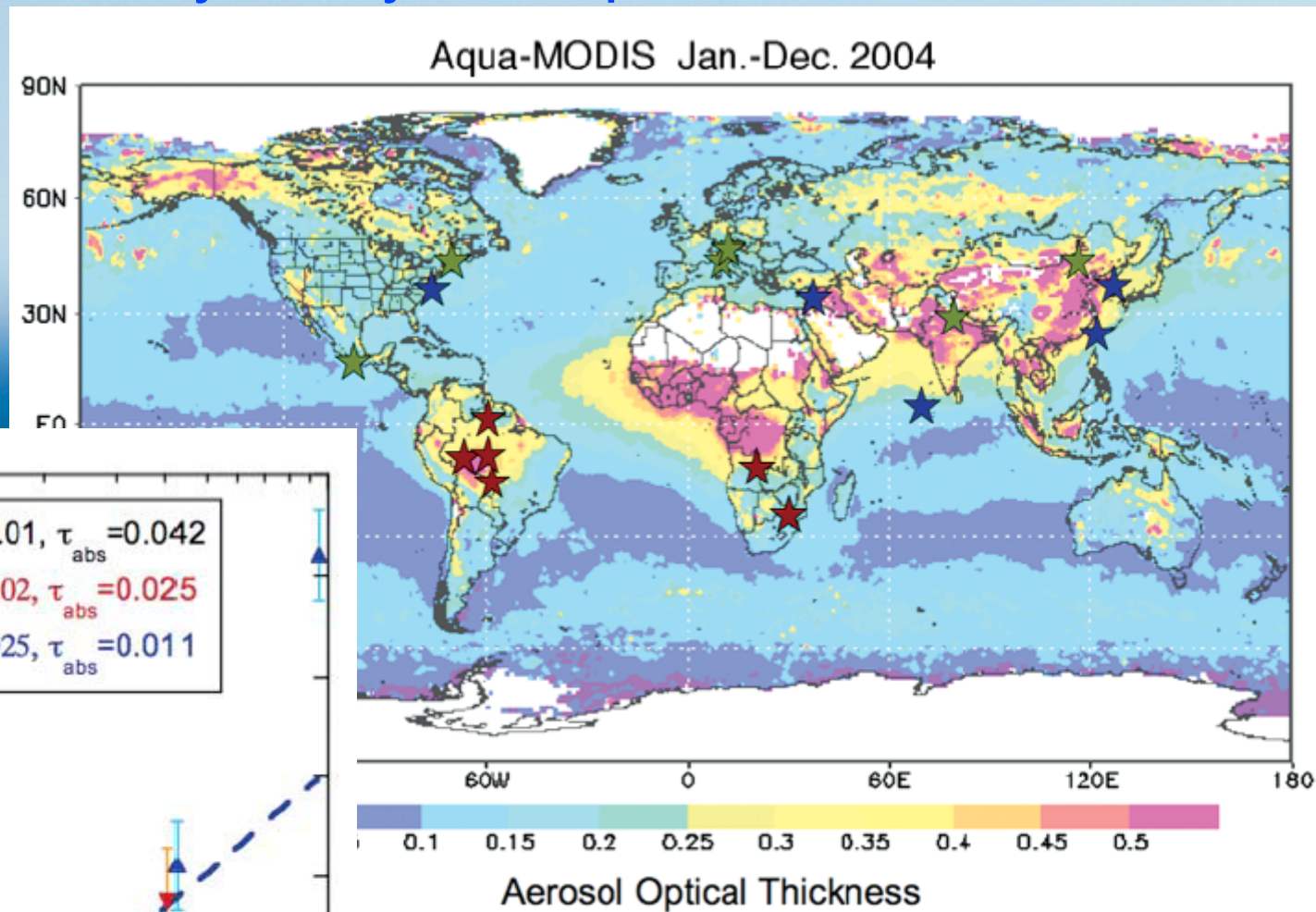
# AERONET: światowa sieć pomiarów AOT

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?

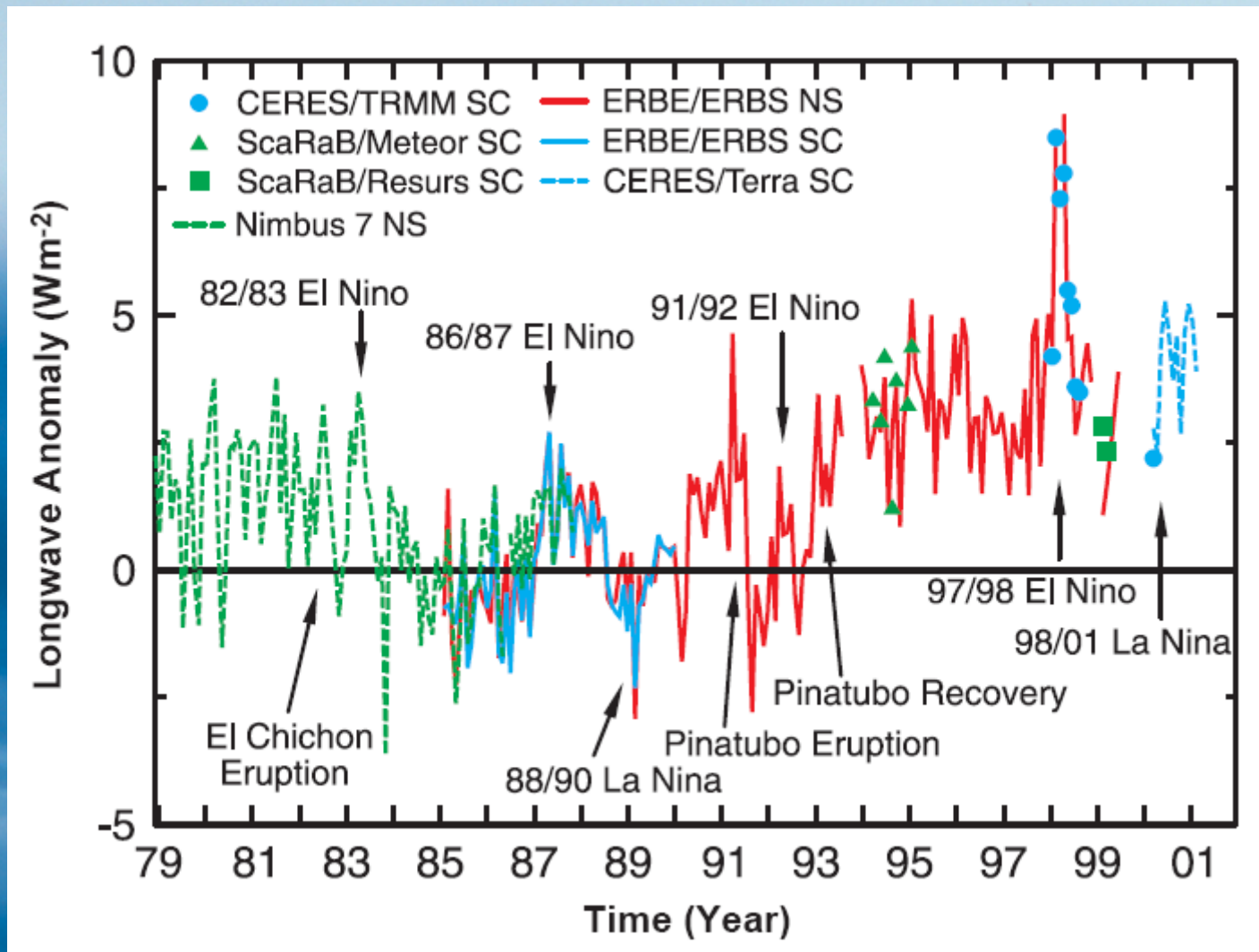
Analiza danych z sieci AERONET wykazuje, że im większa absorpcja aerozolu na danym terenie tym mniej wzrasta ilość chmur z wzrostem AOT.



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

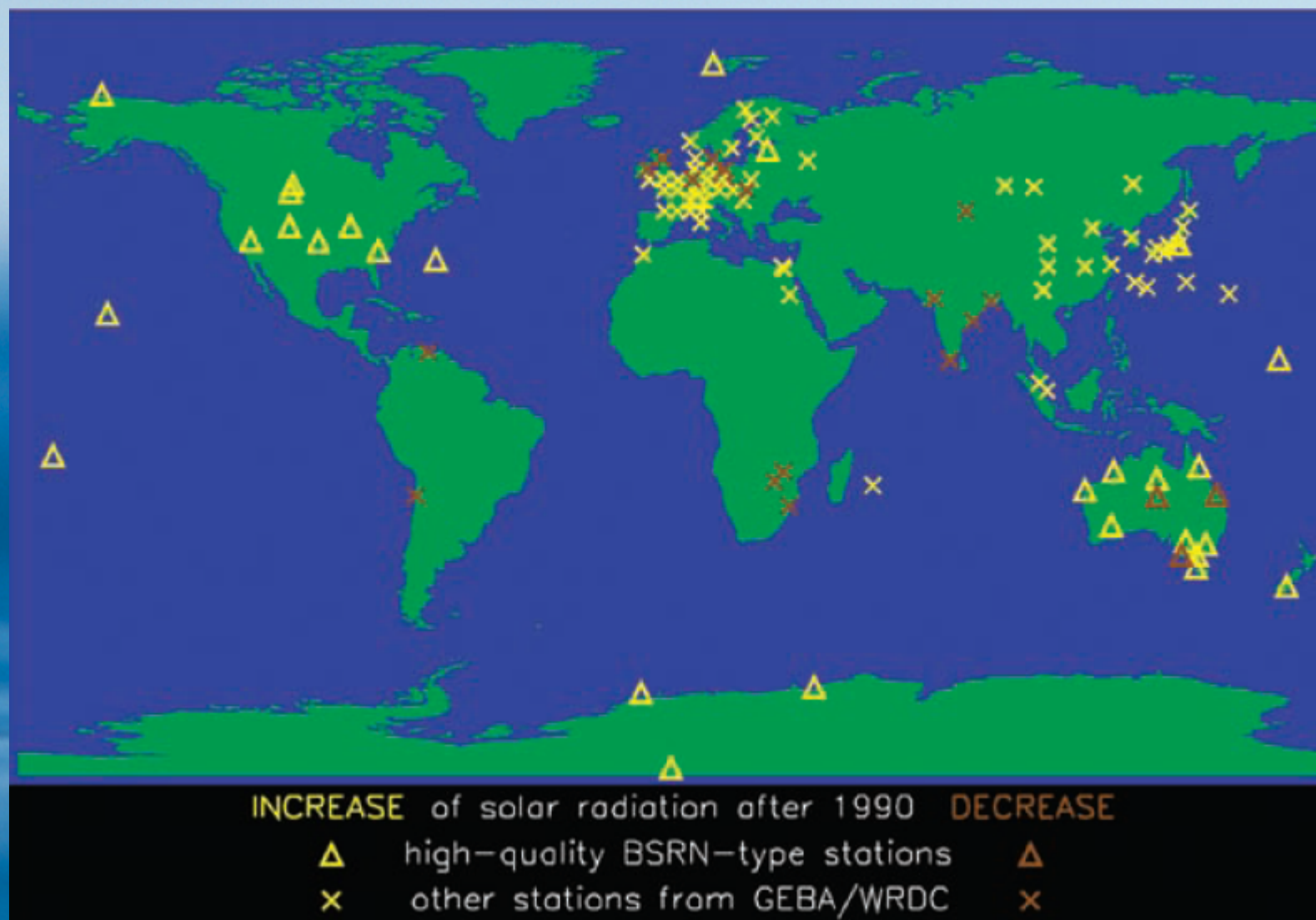
*Kaufman & Koren 2006 (Science)*

# 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?

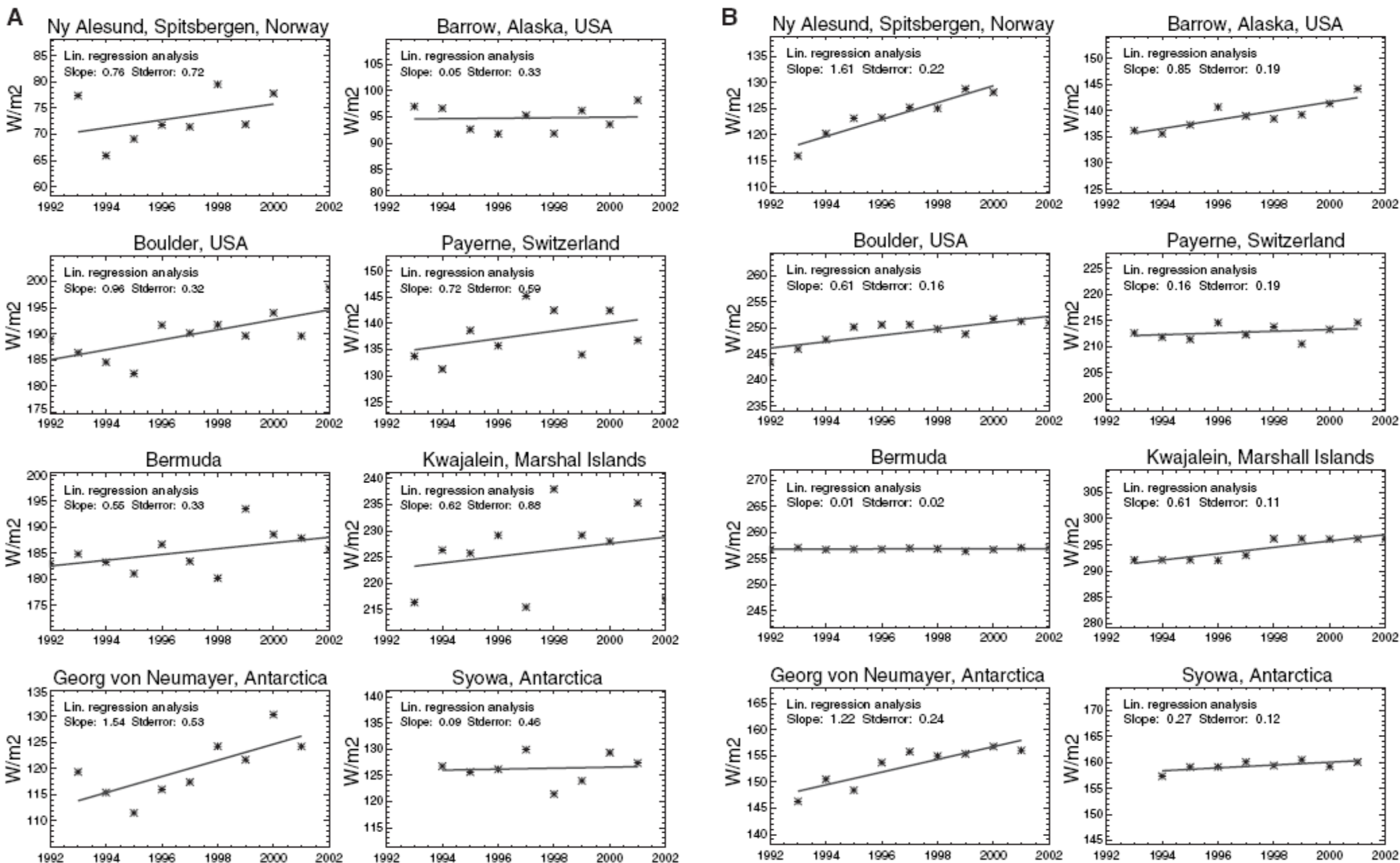
# Ziemia (prawie cała) rozjaśnia się



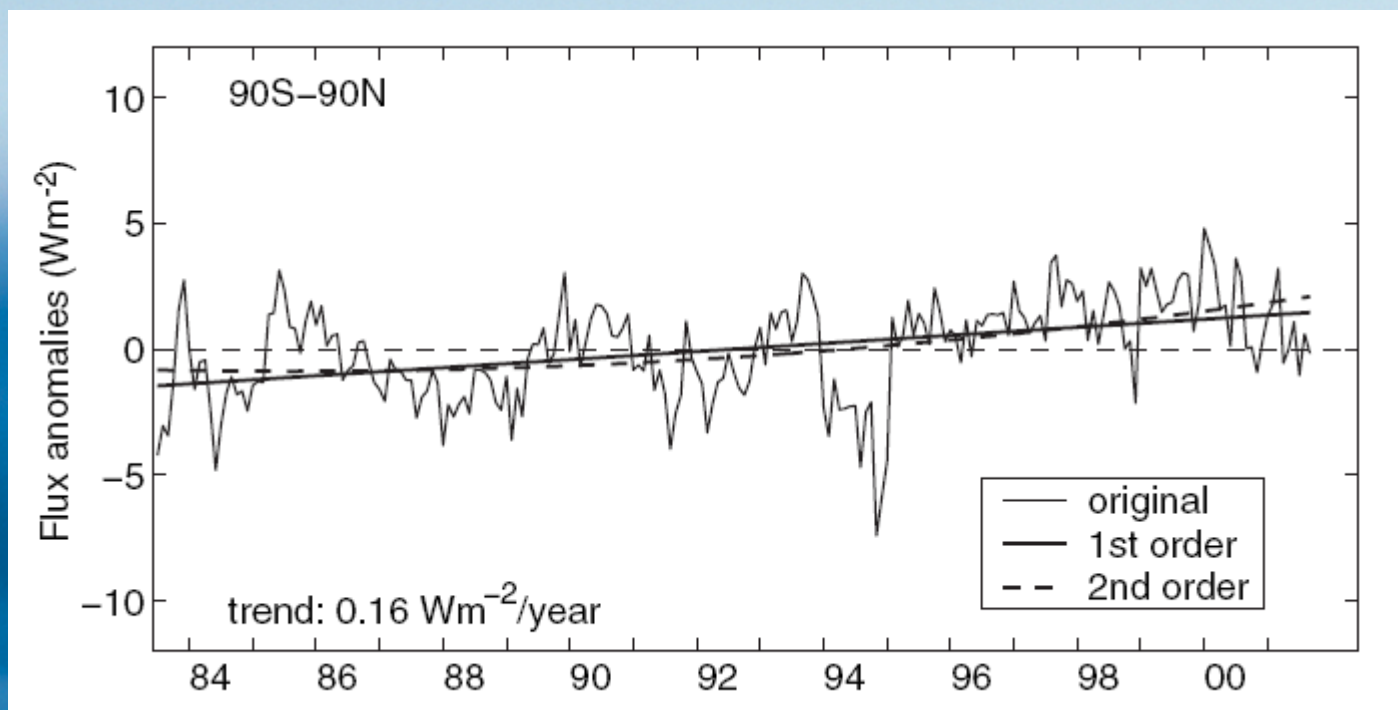
Większość stacji pomiarowych na powierzchni Ziemi notują **zwiększone** oświetlenie (mniejszą grubość aerozolu) od roku 1990. Jedynie stacje w tropikach na subkontynencie Indyjskim, Afryce i Ameryce Południowej pokazują konsekwentne **zmniejszenie** oświetlenia.

*Wild et al. 2005 (Science)*

# Trend “pojaśnienia” dotyczy większości półkuli północnej



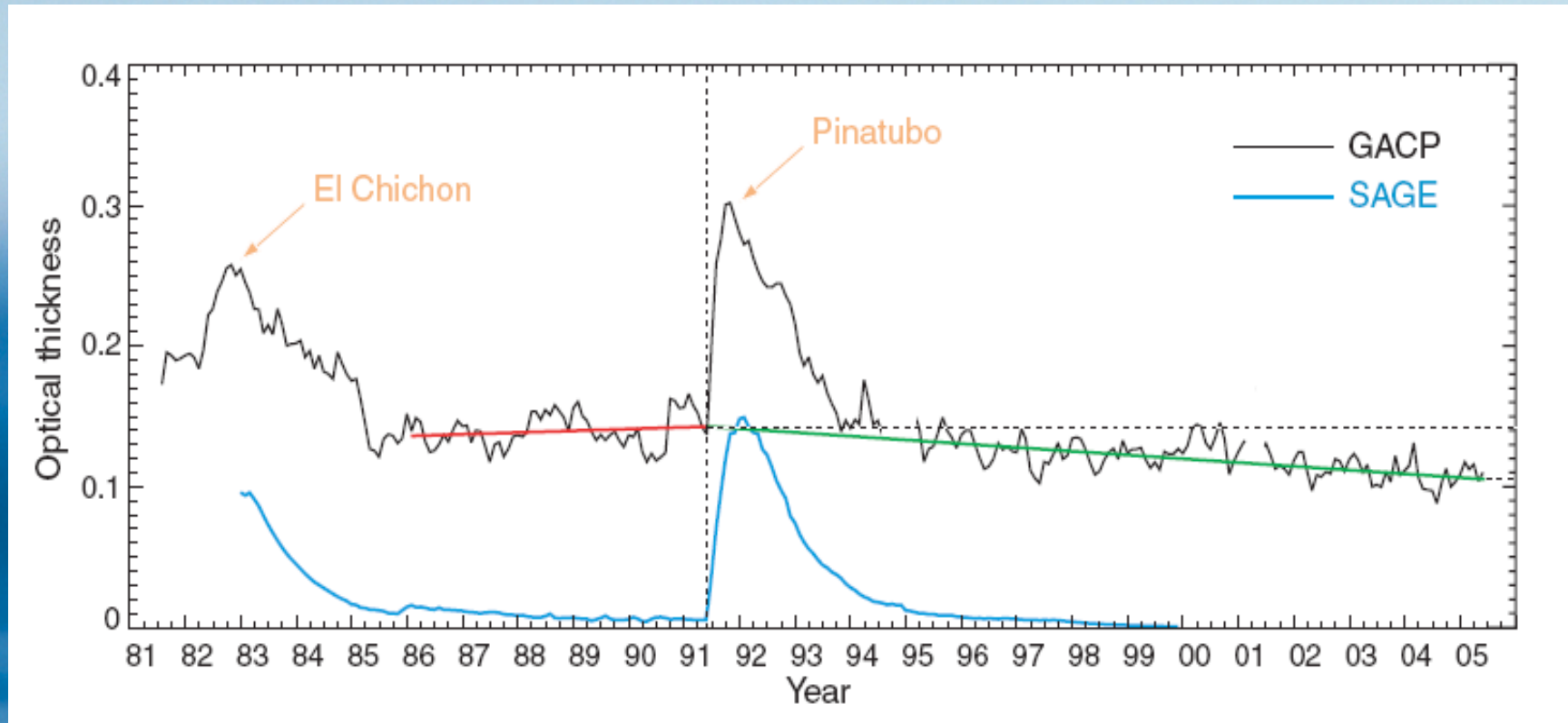
# Wyniki satelitarne potwierdzają wyjaśnienie



Najdłuższy zapis satelitarny (od 1983 r.) potwierdza wyjaśnienie 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)*

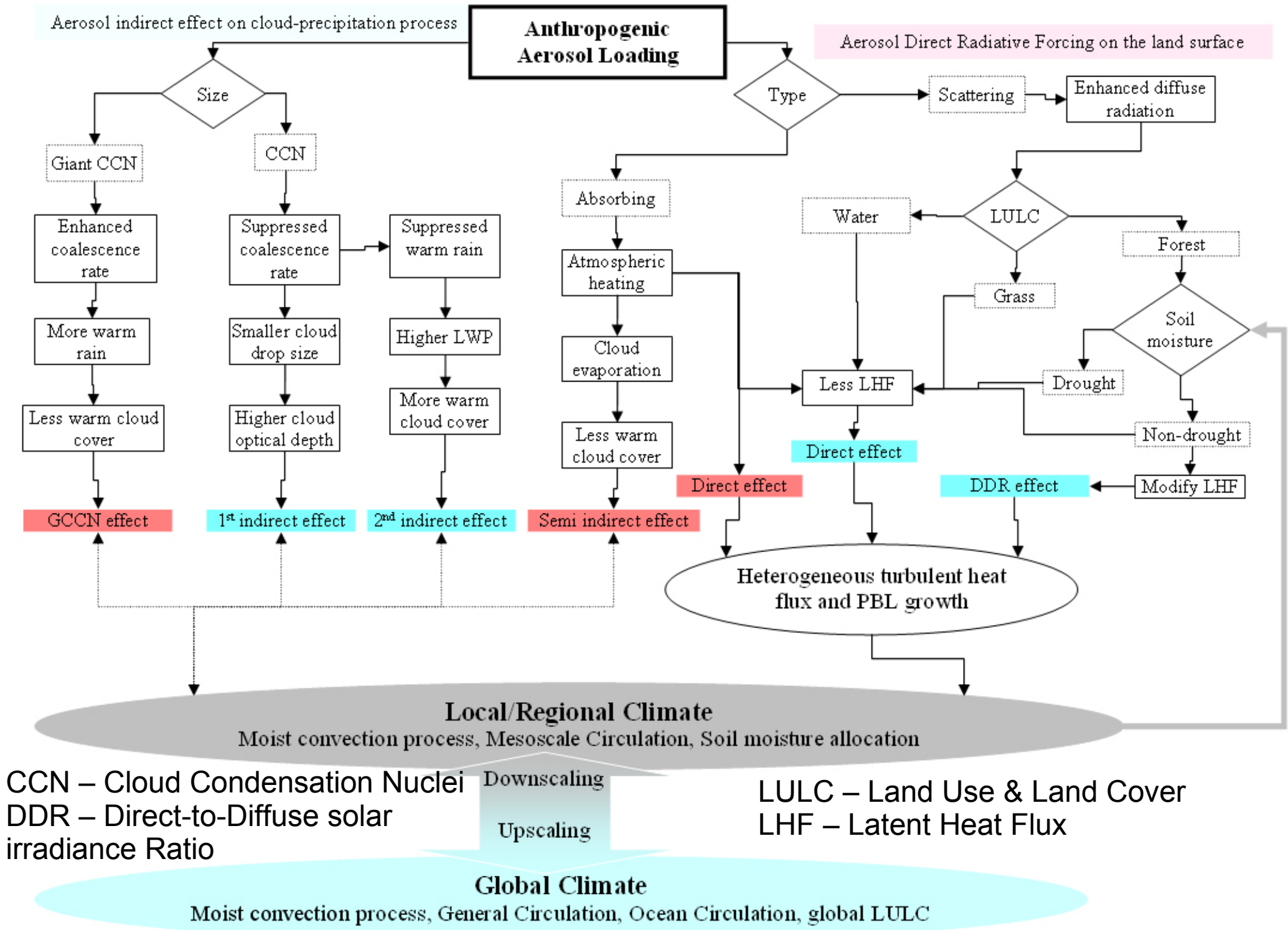
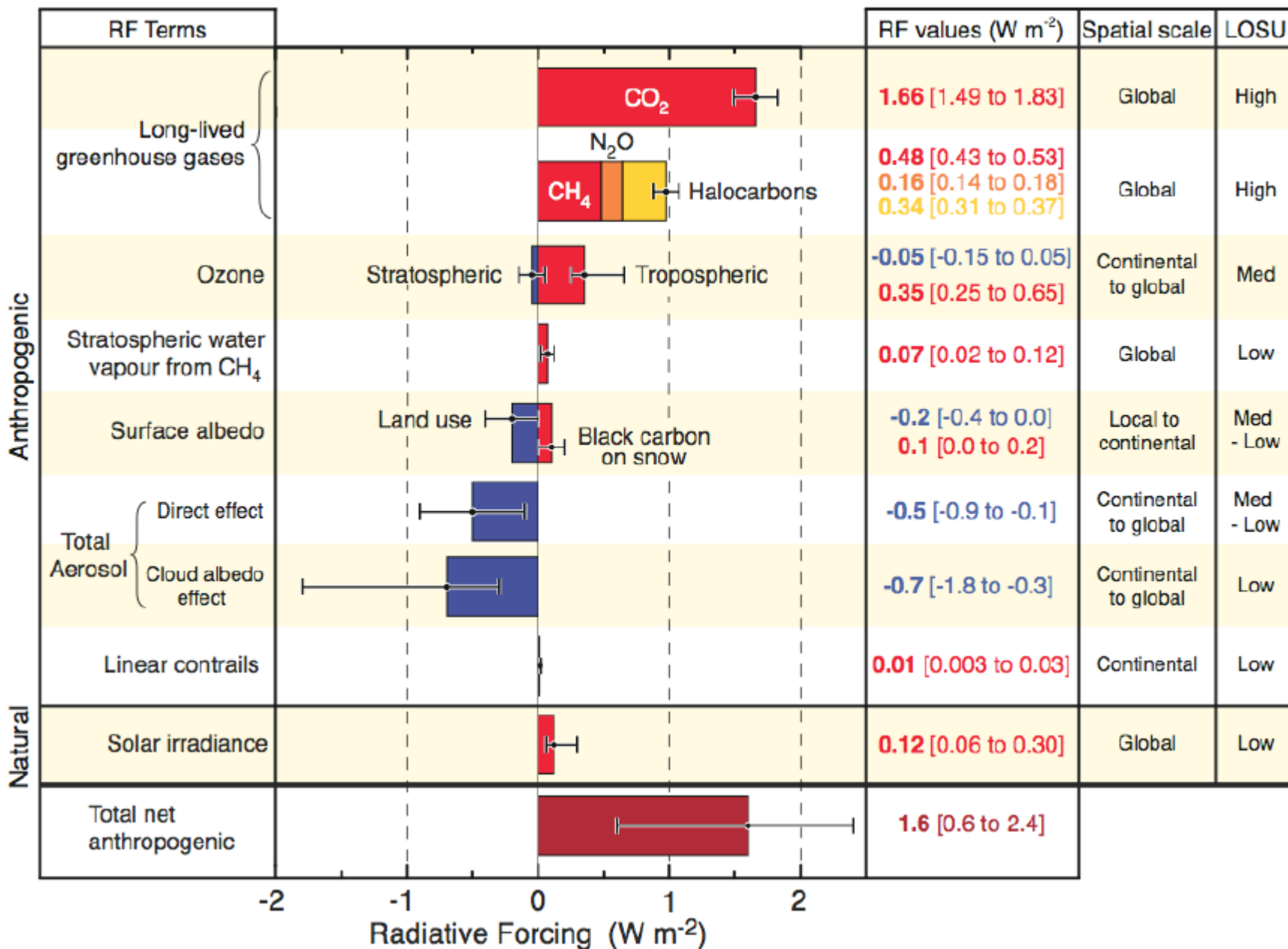


Figure. Hypothesis chart of the aerosol effect on the regional climate (by Toshihisa Matsui and Roger A. Pielke)

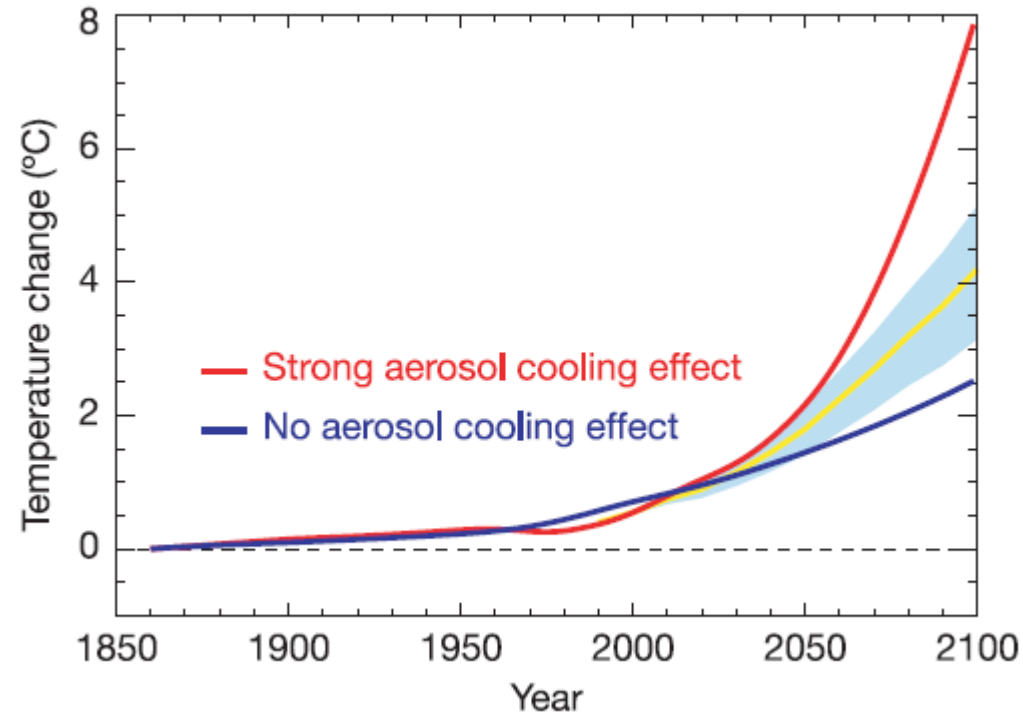
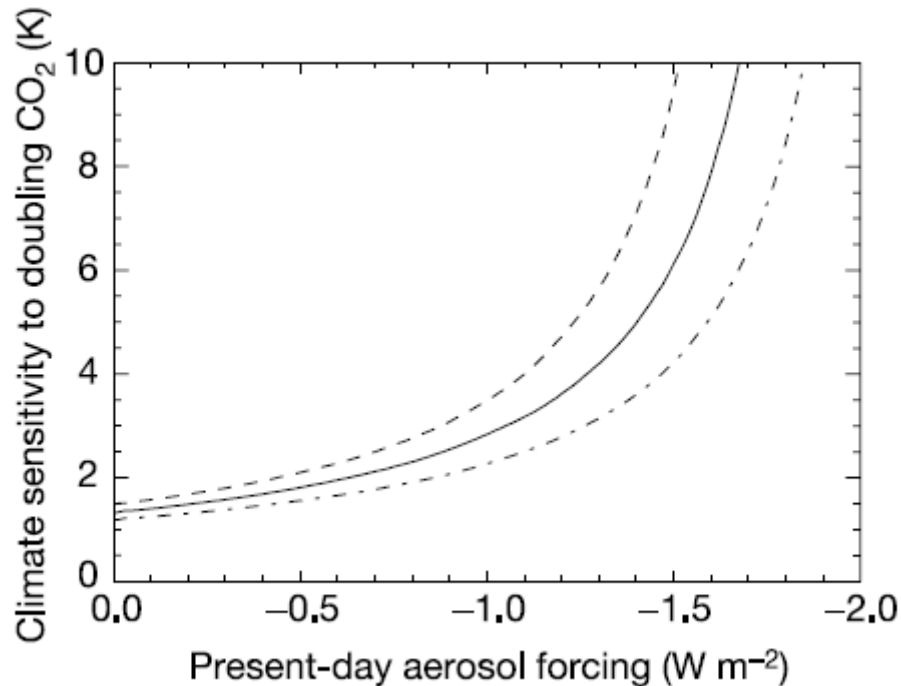
# Raport IPCC: stan wiedzy na rok 2007

## Radiative Forcing Components

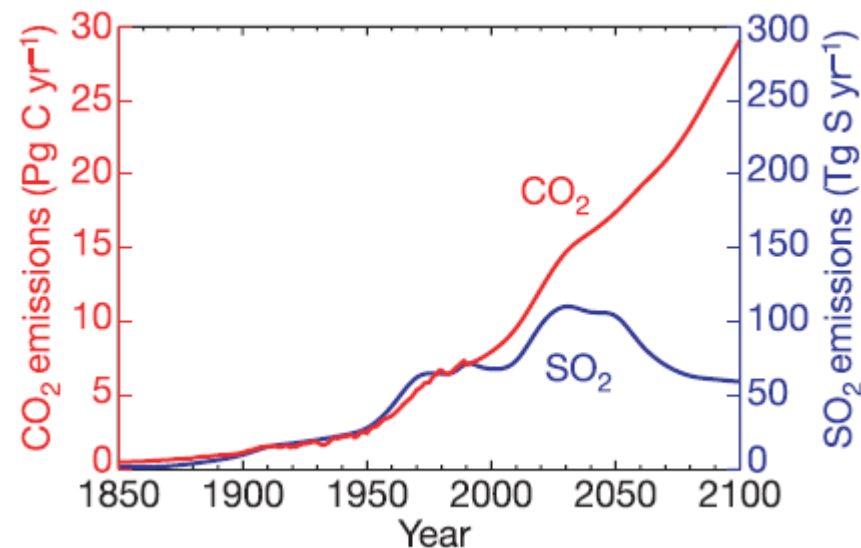


©IPCC 2007: WG1-AR4

# 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 1/3

- Efekt zwiększania ilości chmur przez aerozol („drugi bezpośredni”) jest słabszy 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 CO<sub>2</sub> co może oznaczać szybsze ocieplanie Ziemi.
- Szybszemu ocieplaniu Ziemi pomoże też fakt, że ilość aerozolu w atmosferze spada od ok. 1990 r. (upadek ZSRR), zaś koncentracja CO<sub>2</sub> wciąż rośnie.



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



Dziękuję za uwagę

Za **tydzień** (23.4.2007 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*