

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 9:

Globalne ocieplenie a ocean  
(zmienność antropogeniczna)

Jacek Piskozub

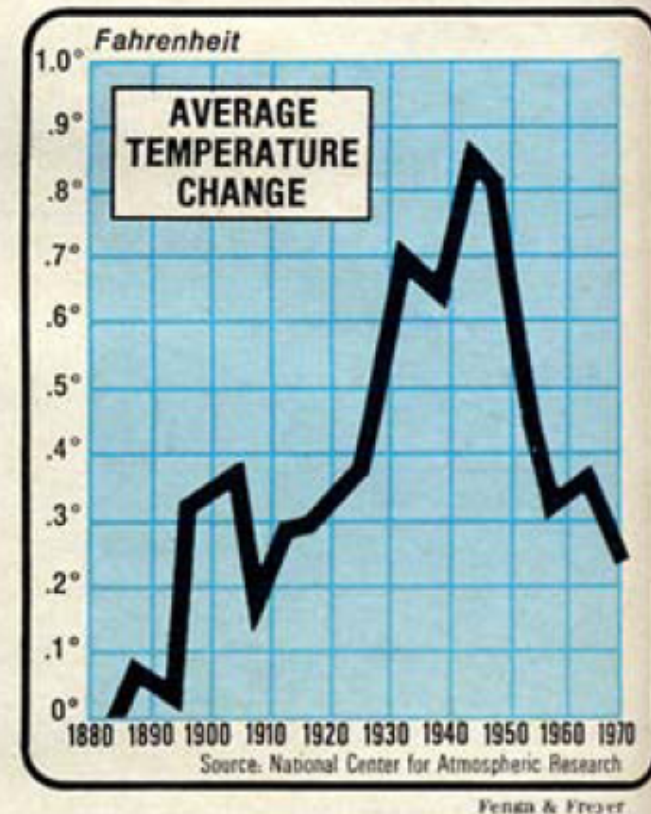
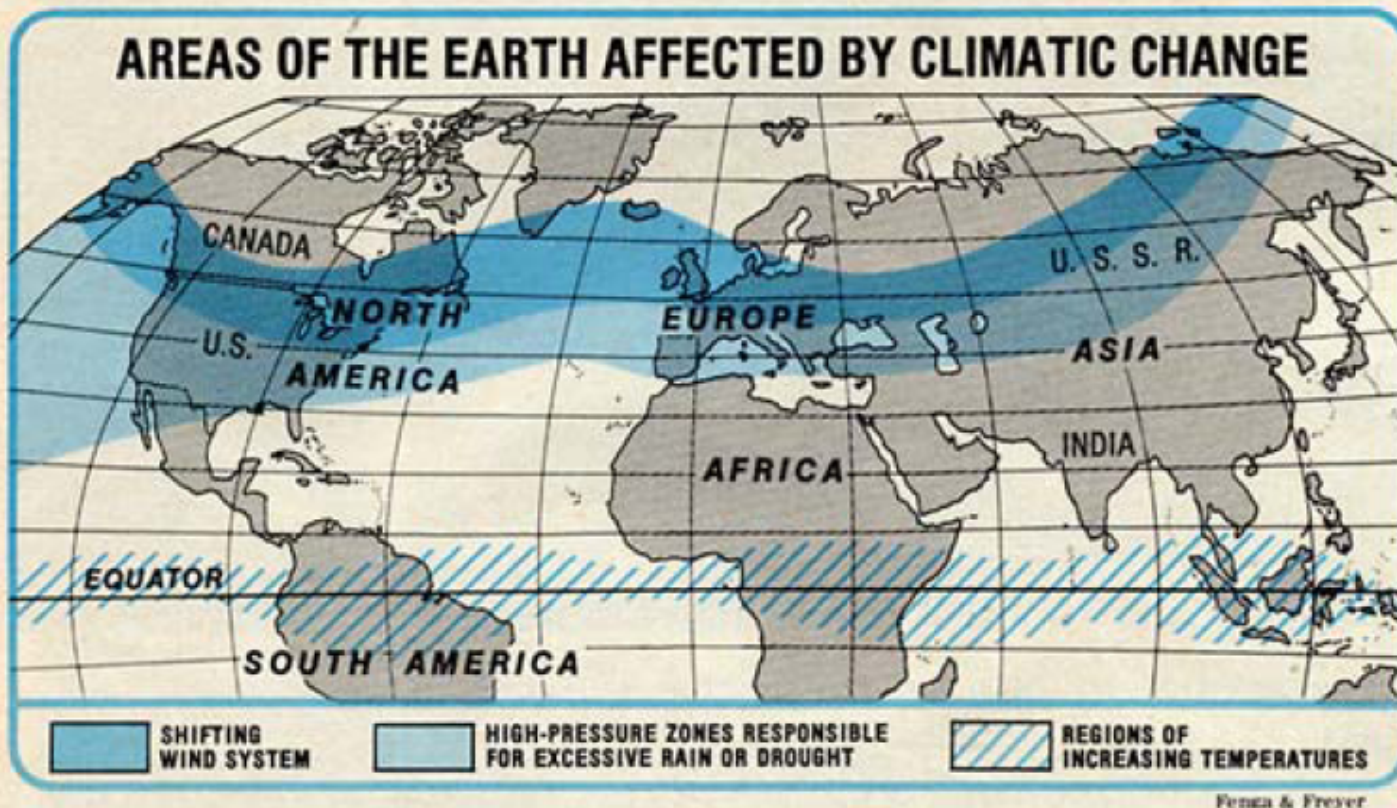
Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2010/11 r.

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

# Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów 11.10.2010-24.01.2011

- ✓ 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*)
- ✓ Aerosol: 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

# Newsweek 1975: "Ochładzający się świat"



Jeszcze w 1975 r. *Newsweek* straszył ochładzającym się światem na podstawie trendu średniej światowej temperatury z lat 1945-1972. Wbrew późniejszym legendom nie straszył nową epoką lodową. Mimo to stanowi to cenne ostrzeżenie aby nie wyciągać przedwczesnych wniosków z krótkich serii czasowych.

# Science 1975: “U progu globalnego ocieplenia”

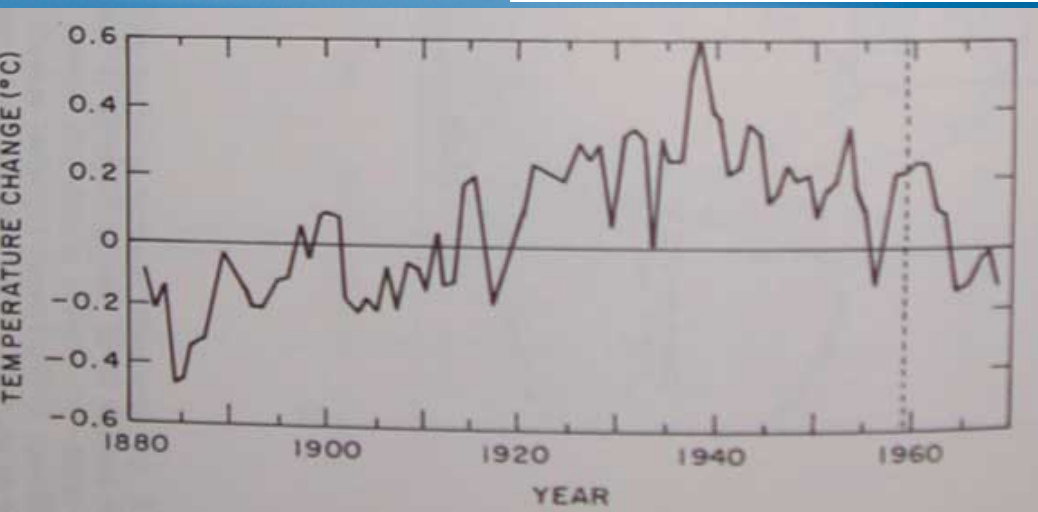
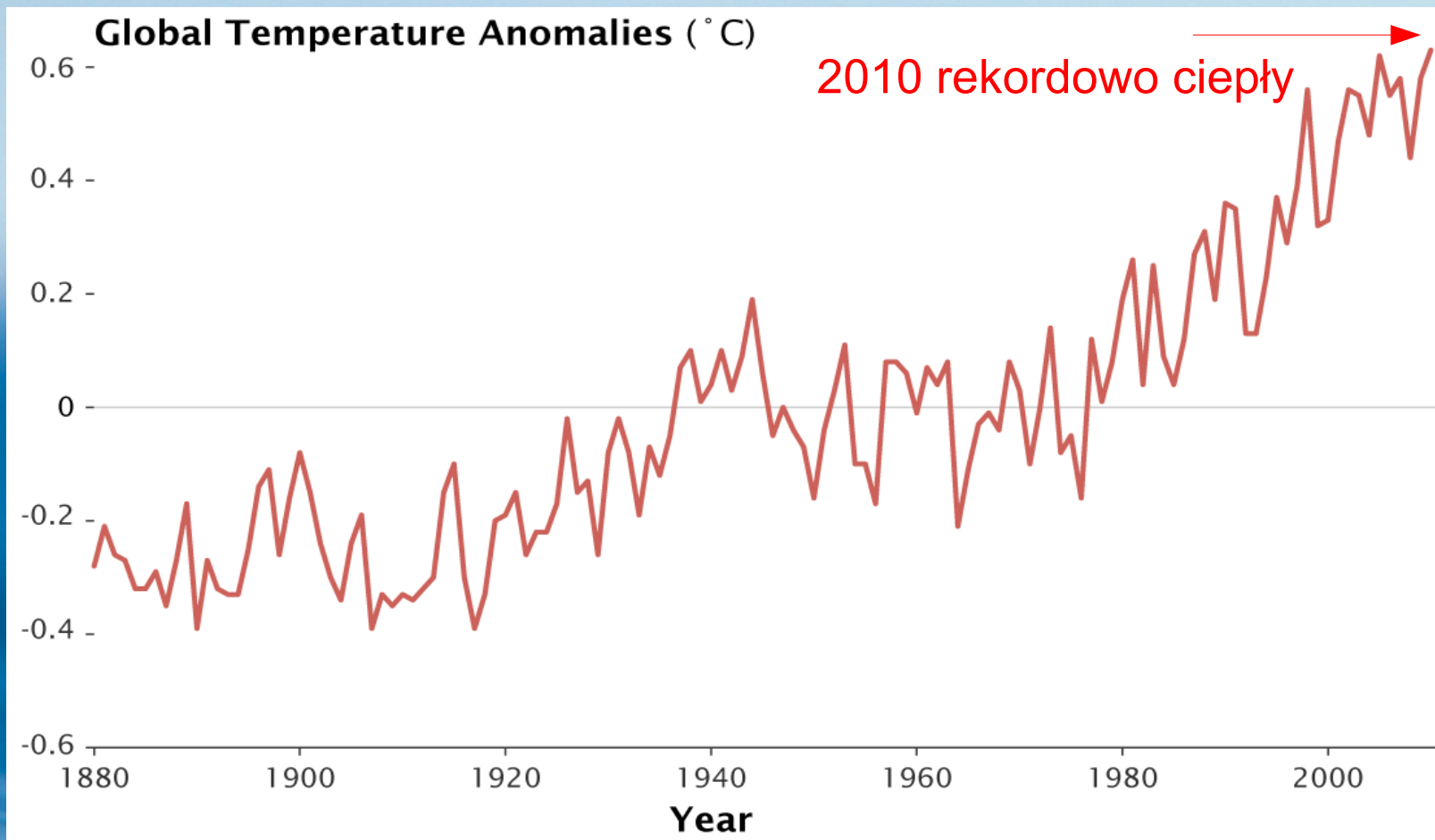
## **Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?**

*Abstract. If man-made dust is unimportant as a major cause of climatic change, then a strong case can be made that the present cooling trend will, within a decade or so, give way to a pronounced warming induced by carbon dioxide. By analogy with similar events in the past, the natural climatic cooling which, since 1940, has more than compensated for the carbon dioxide effect, will soon bottom out. Once this happens, the exponential rise in the atmospheric carbon dioxide content will tend to become a significant factor and by early in the next century will have driven the mean planetary temperature beyond the limits experienced during the last 1000 years.*

Jednak w tym samym roku Wally Broecker ostrzegał w Science o możliwym globalnym ociepleniu, słowami które sprawdziły się jak dotąd w 100 %.

# Od 1975 świat konsekwentnie się ogrzewa...

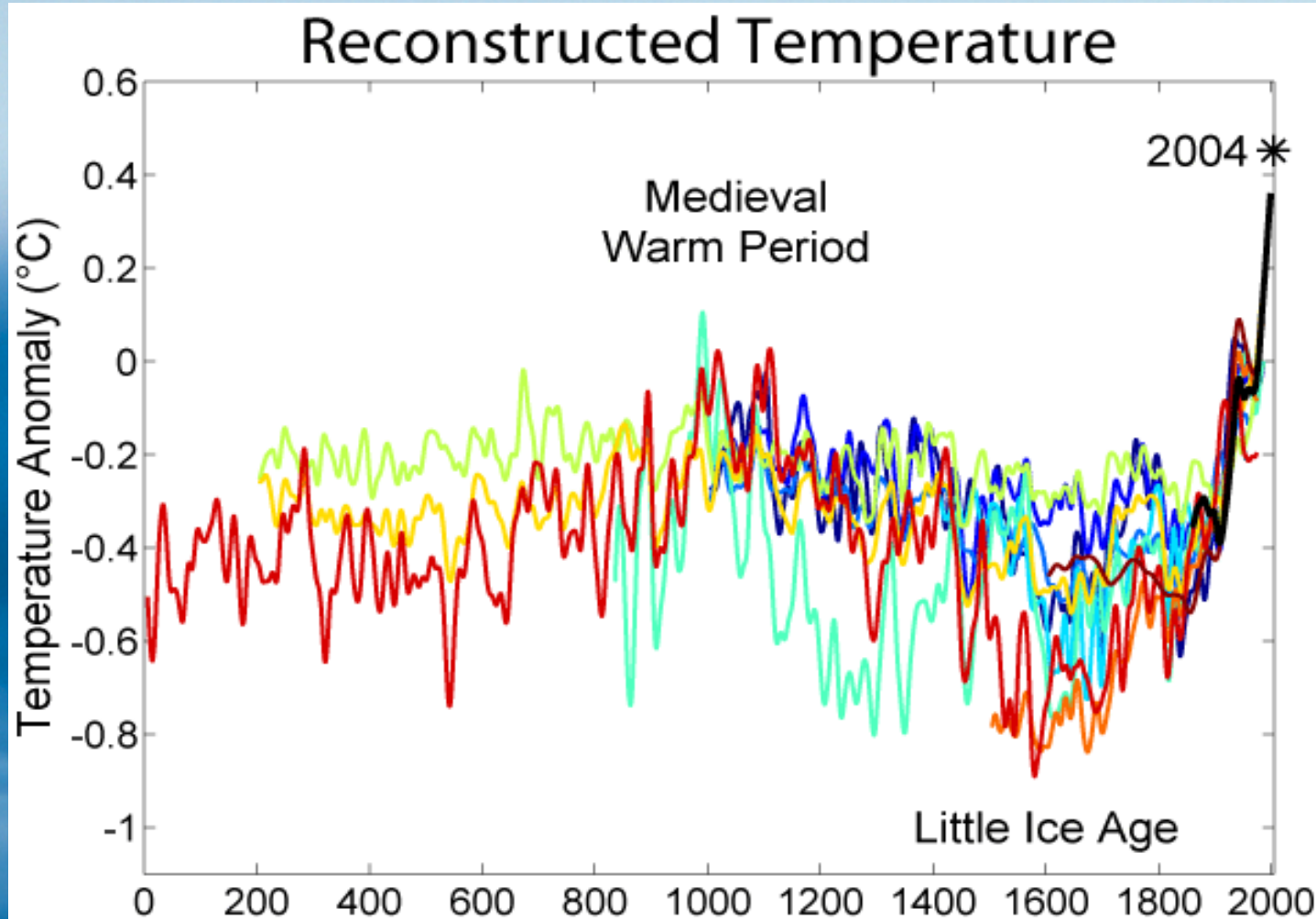
Niedawna historia średniej temperatury powierzchni Ziemi wg. NASA, z perspektywy roku 1975 i 2011.



Dziewięć z dziesięciu ostatnich lat (2001-2010) należy do 10 najgorętszych lat od czasu rozpoczęcia pomiarów meteorologicznych (1998 in, 2008 out).

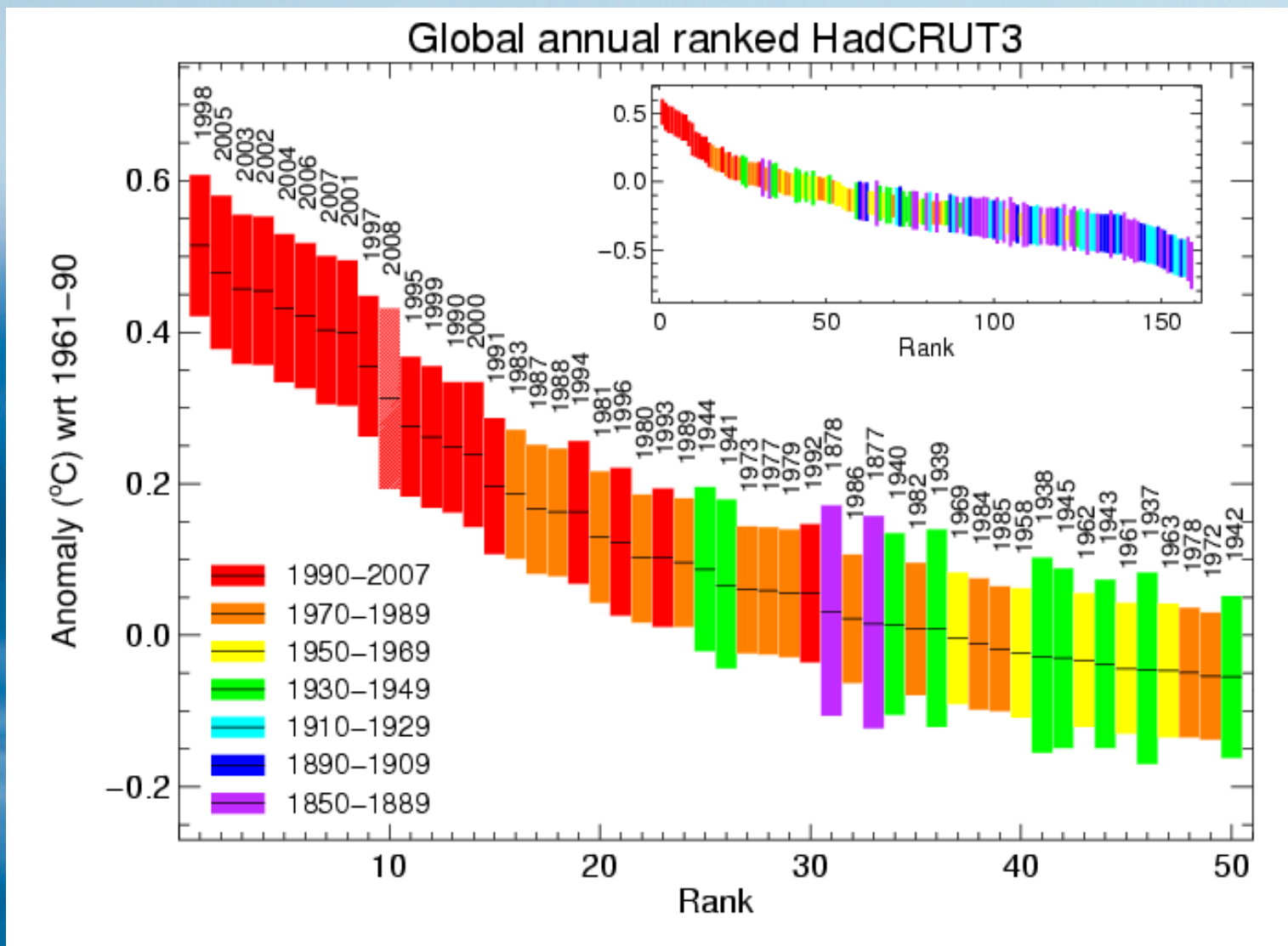
NAS 1975 report after Budyko 1968 & <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20110112/>

...i to w tempie nie widzianym od setek lat.



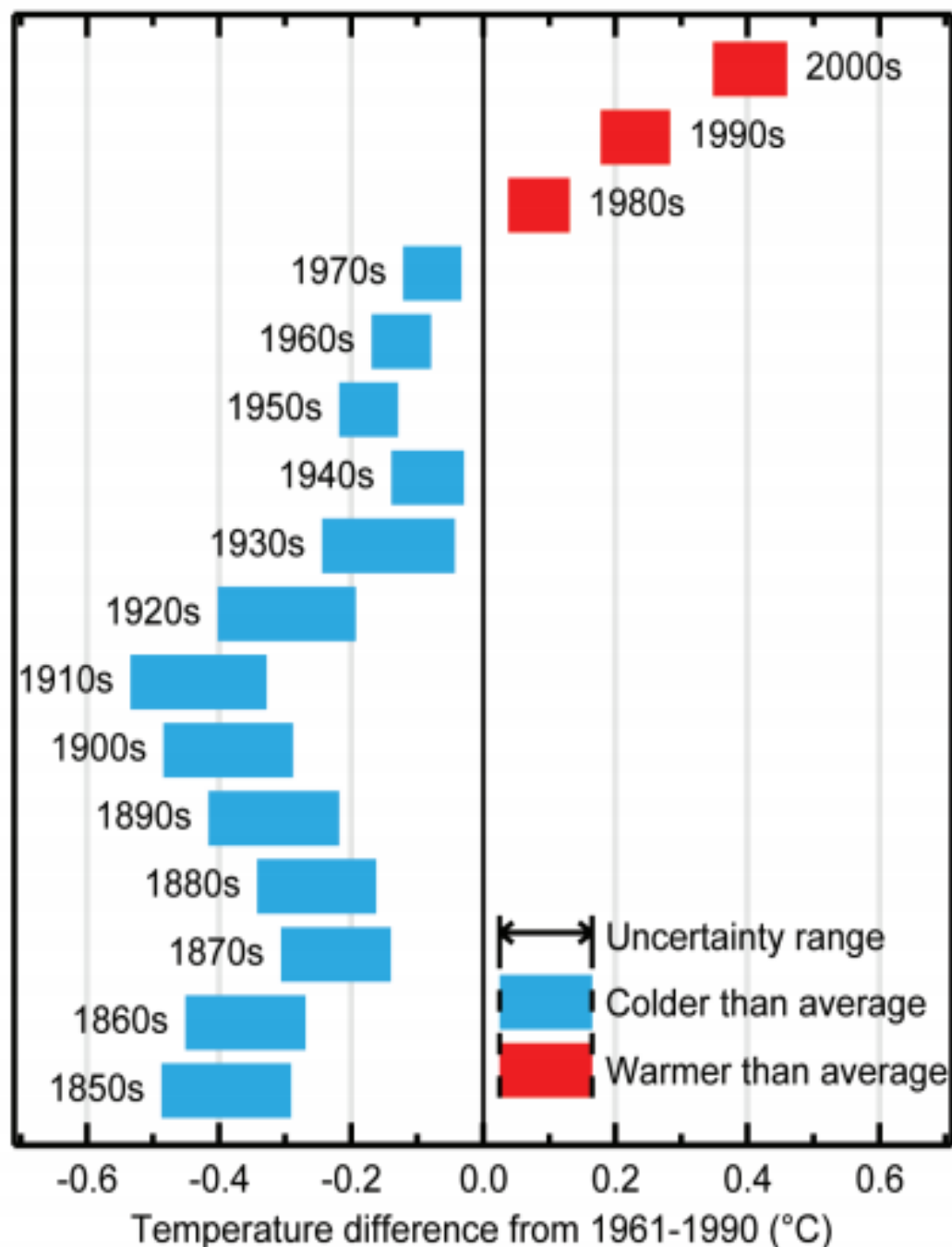
Wszystkie najnowsze rekonstrukcje klimatu ostatniego tysiąclecia (lub dwóch) wskazują na to, że zeszłe 30 lat jest bez precedensu przynajmniej kilkuset lat, a być może od optimum klimatycznego we wczesnym holocenie (8-6 ka).

# 2008: według prasy „najzimniejszy rok stulecia”



Jednak i tak cieplejszy niż wszystkie lata 20-go wieku z wyjątkiem dwóch (1997 i 1998), dziesiąty najcieplejszy rok od początku pomiarów meteorologicznych.

# Średnie temperatury dekad od początku meteorologii



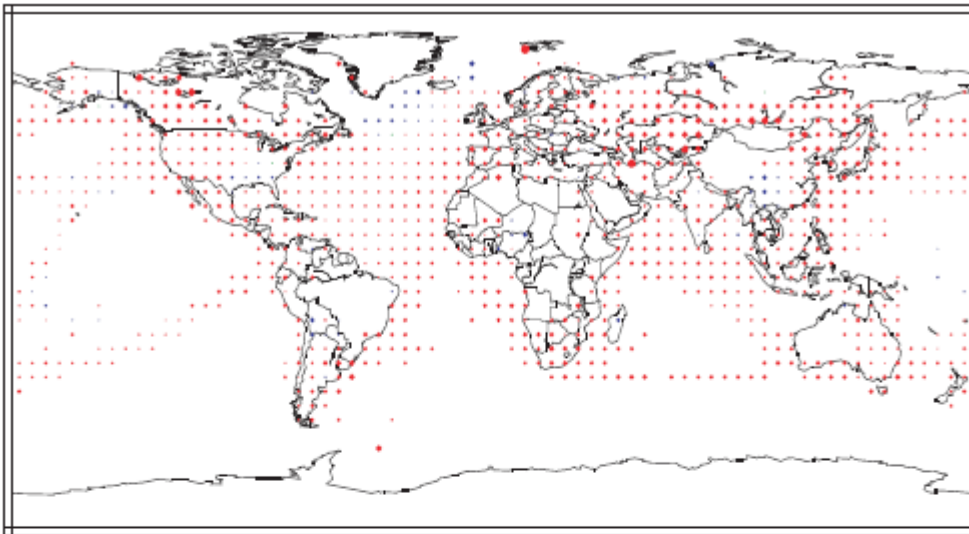
Crown Copyright 2010. Source: Met Office

Temperatury globalne zwiększyły się o 0.8 C od połowy XIX wieku (początku światowej sieci pomiarów meteorologicznych). Większość tego ocieplenia to ostatnie 40 lat.

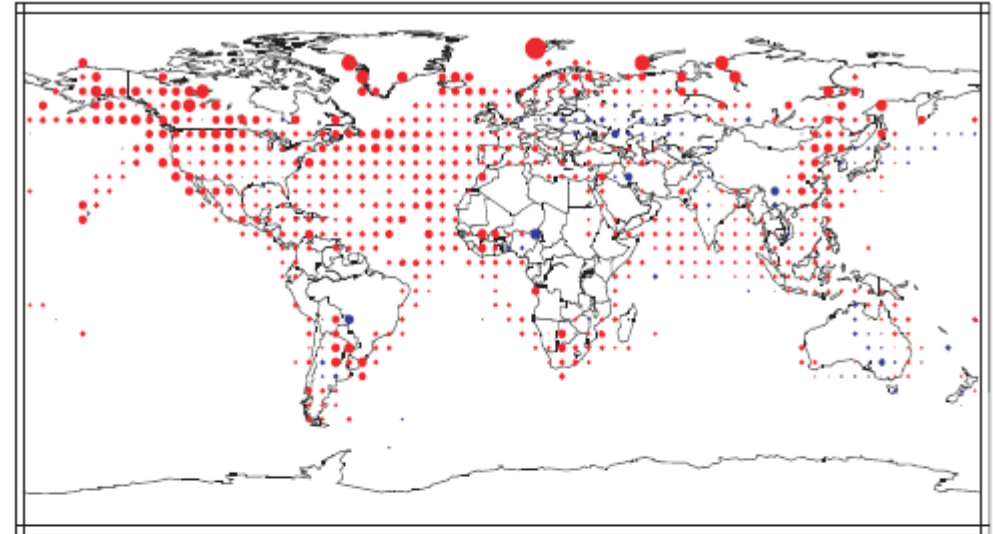
*“State of the Climate 2009”  
ed. D.S. Arndt (BAMS)*

# Trendy temperature XX wieku

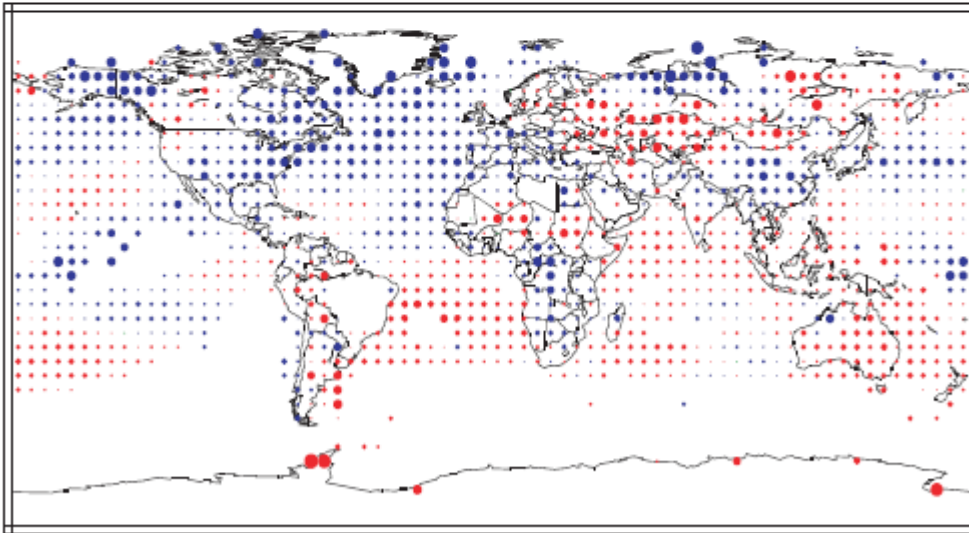
(a) Annual temperature trends, 1901 to 2000



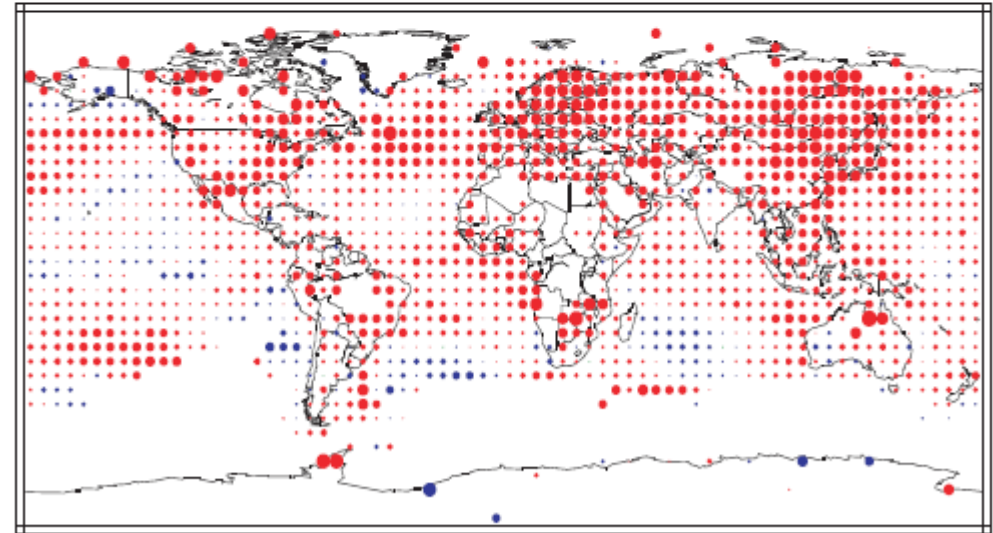
(b) Annual temperature trends, 1910 to 1945



(c) Annual temperature trends, 1946 to 1975



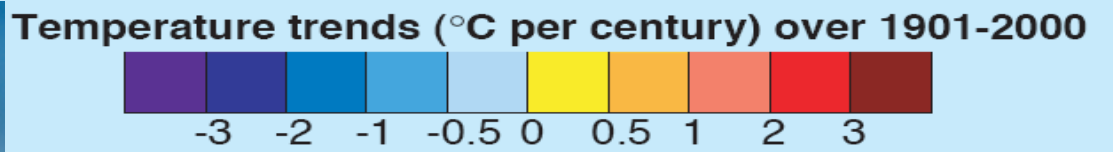
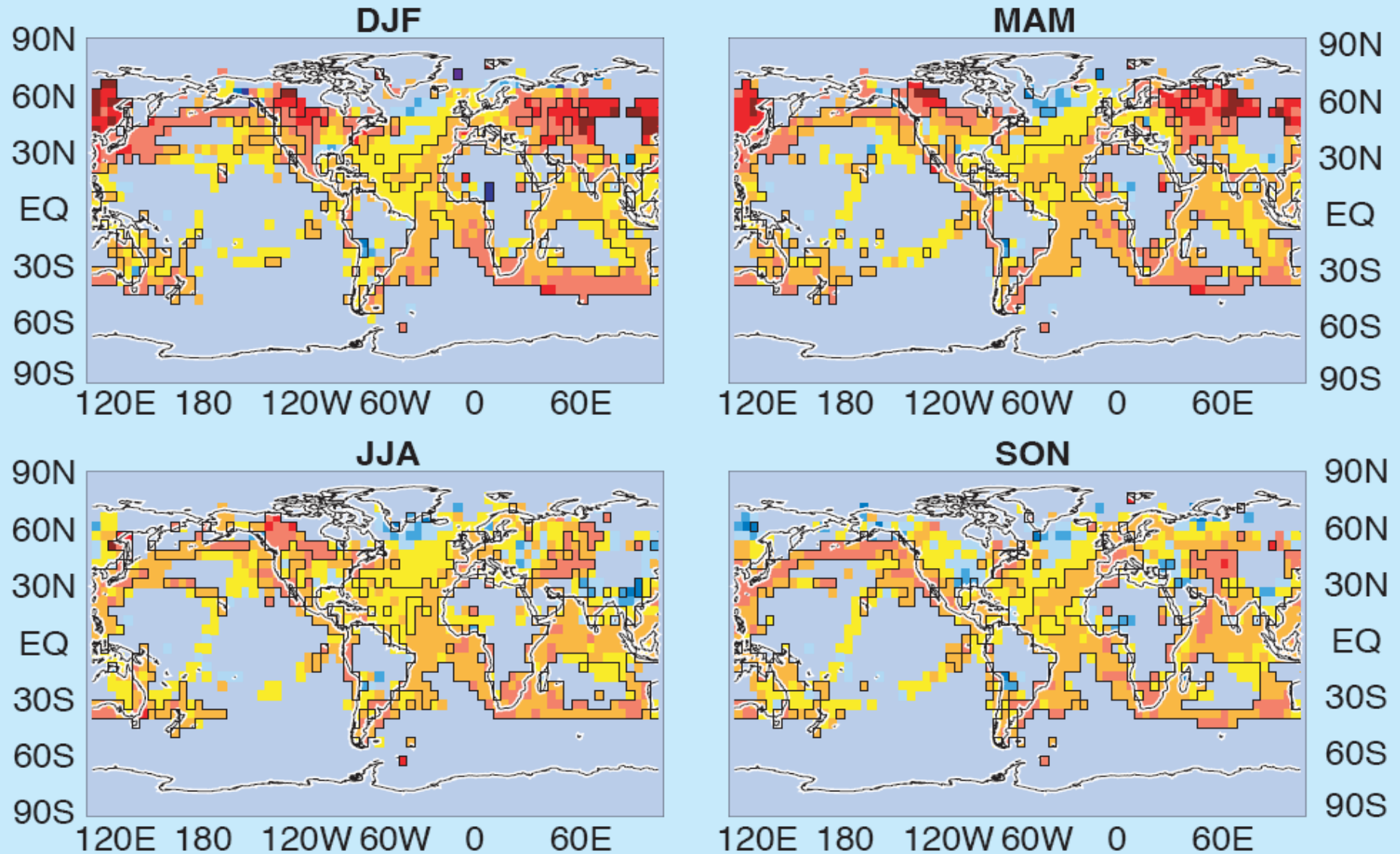
(d) Annual temperature trends, 1976 to 2000



-1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1

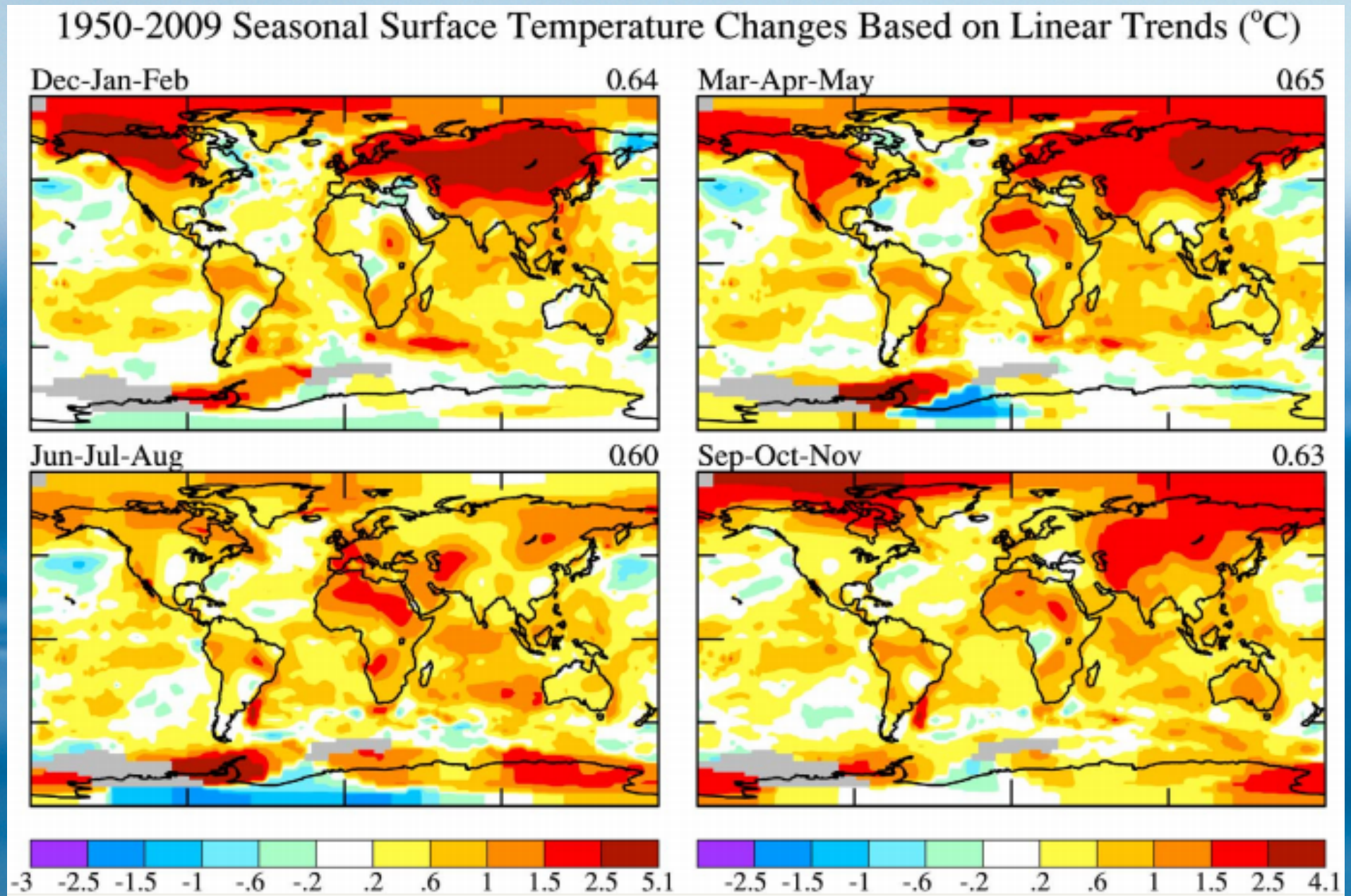
Trend ( $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ )

# Trendy temperatury poszczególnych pór roku



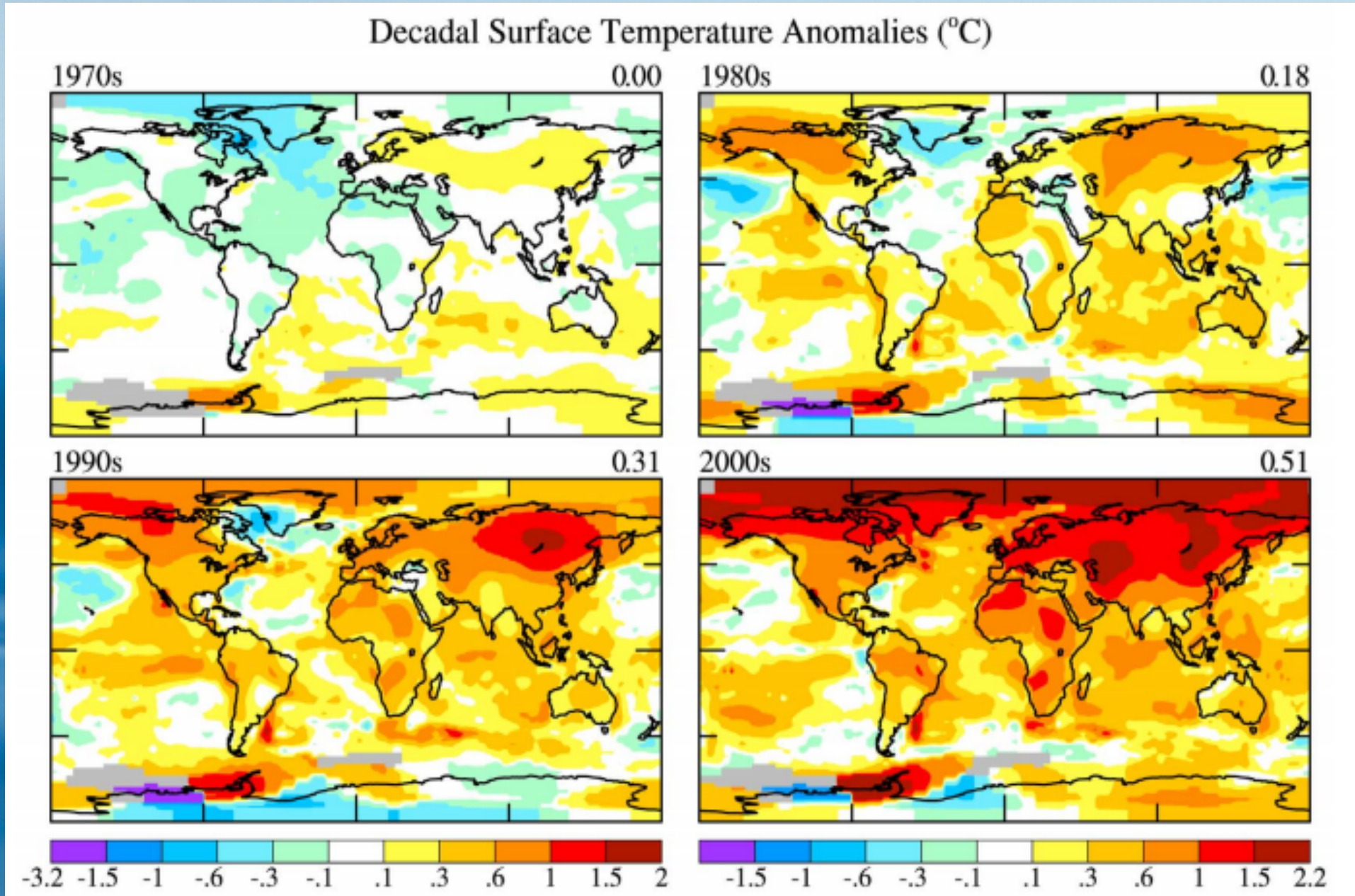
Trendy temperatury [K/stulecie] za lata 1901-2000: na naszej półkuli największe zmiany wystąpiły zimą i wiosną.

# Trendy temperatury poszczególnych pór roku



Trendy temperatury [ $^{\circ}\text{C}/60$  lat] za lata 1950-2009: na naszej półkuli największe zmiany wystąpiły zimą i wiosną. *Hansen et al. 2010 (Reviews of Geophysics)*

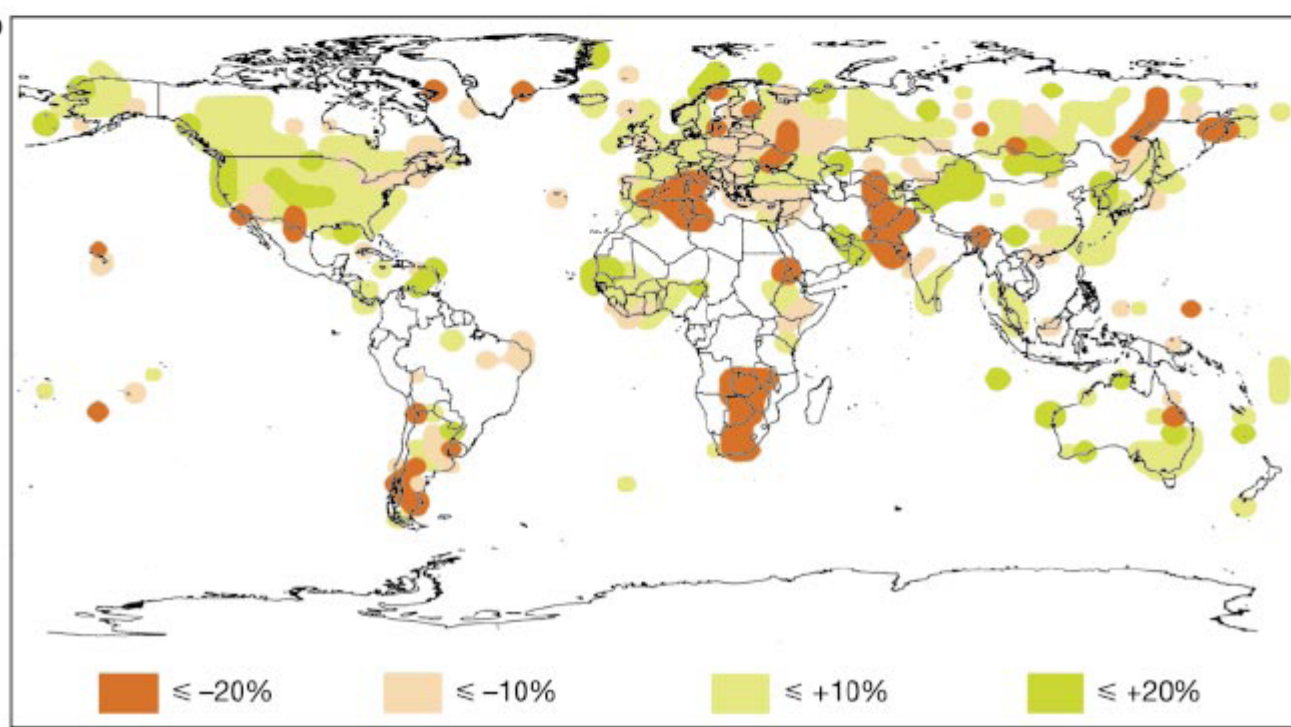
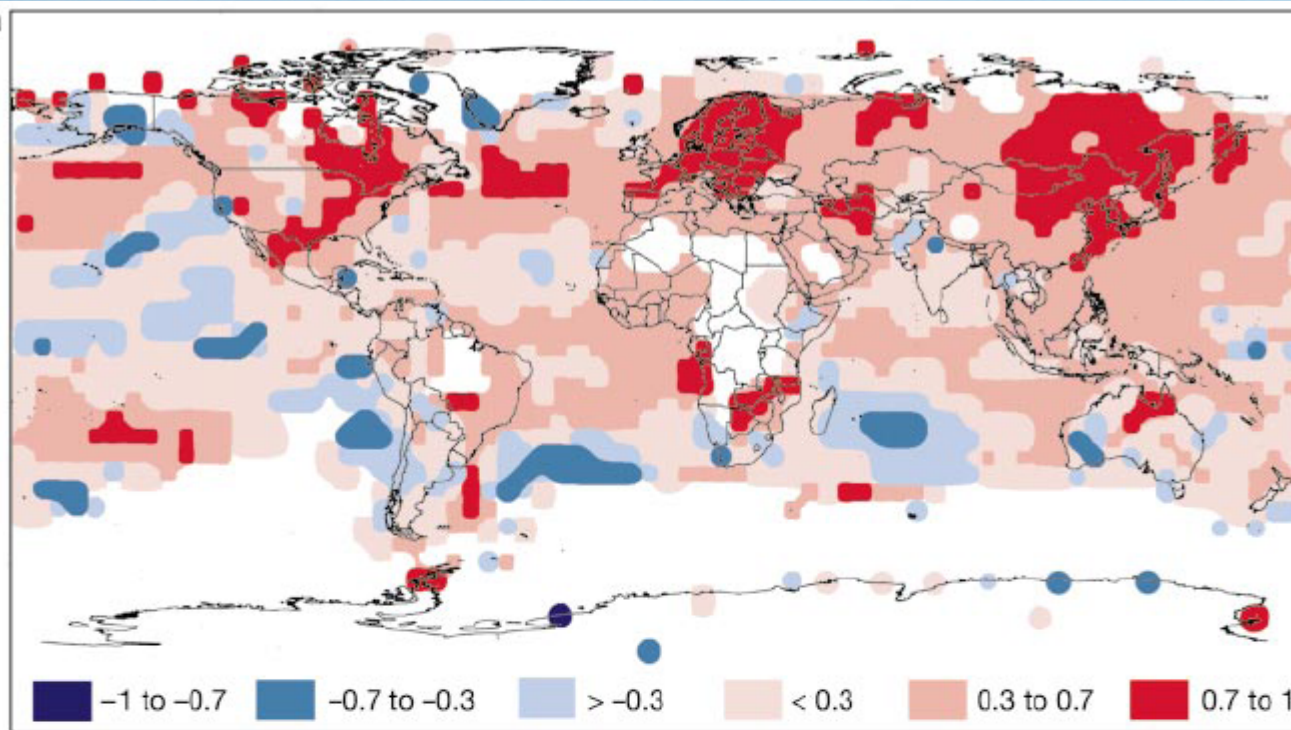
# Anomalie temperatury ostatnich czterech dekad



W ostatnich czterech dekadach każda była istotnie cieplejsza od poprzedniej.

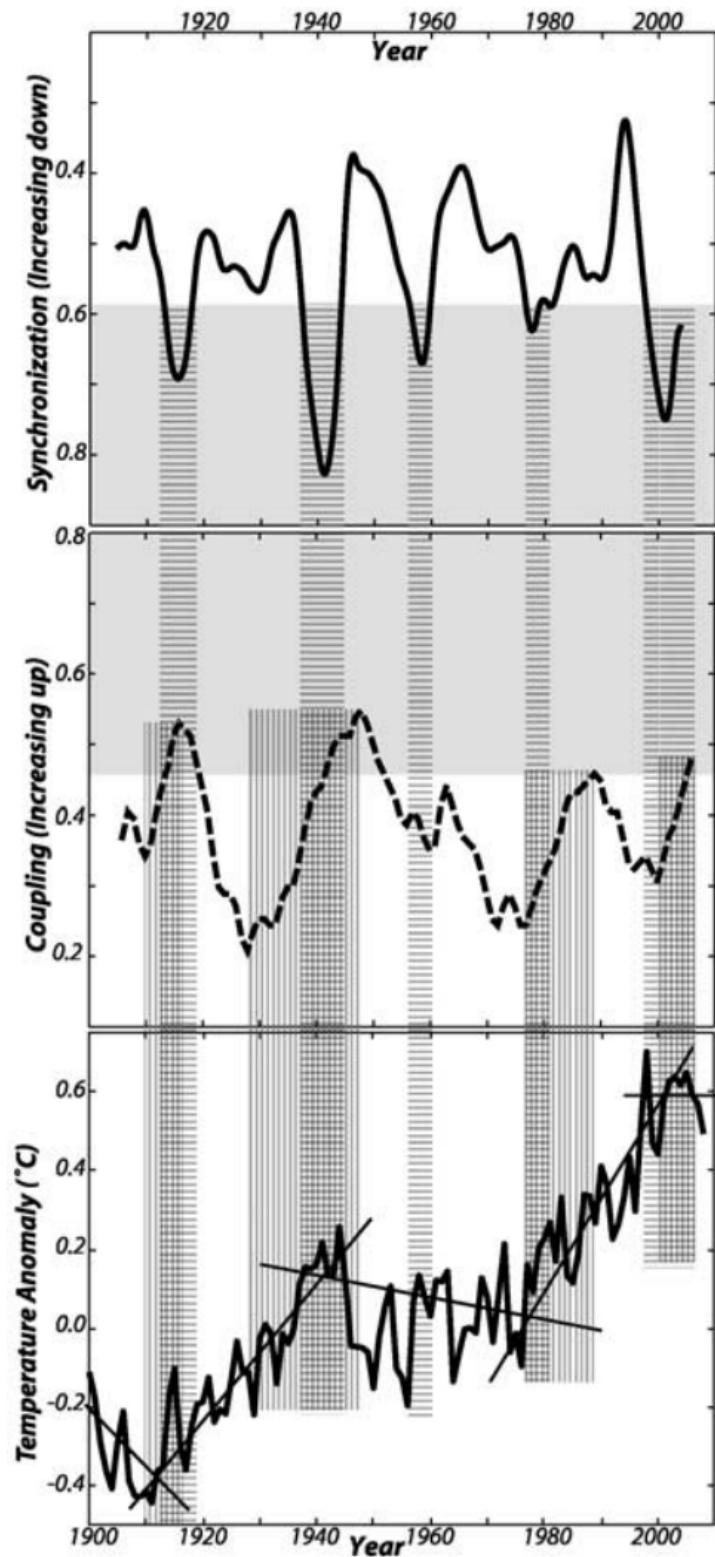
*Hansen et al. 2010 (Reviews of Geophysics)*

## Ostatnie 30 lat: trendy temperatury i opadów



Zmiany temperatury (a) i opadów (b) w okresie 1976-2000. Wartości zmian przeliczone na dekadę (K/10 lat oraz %/10 lat).

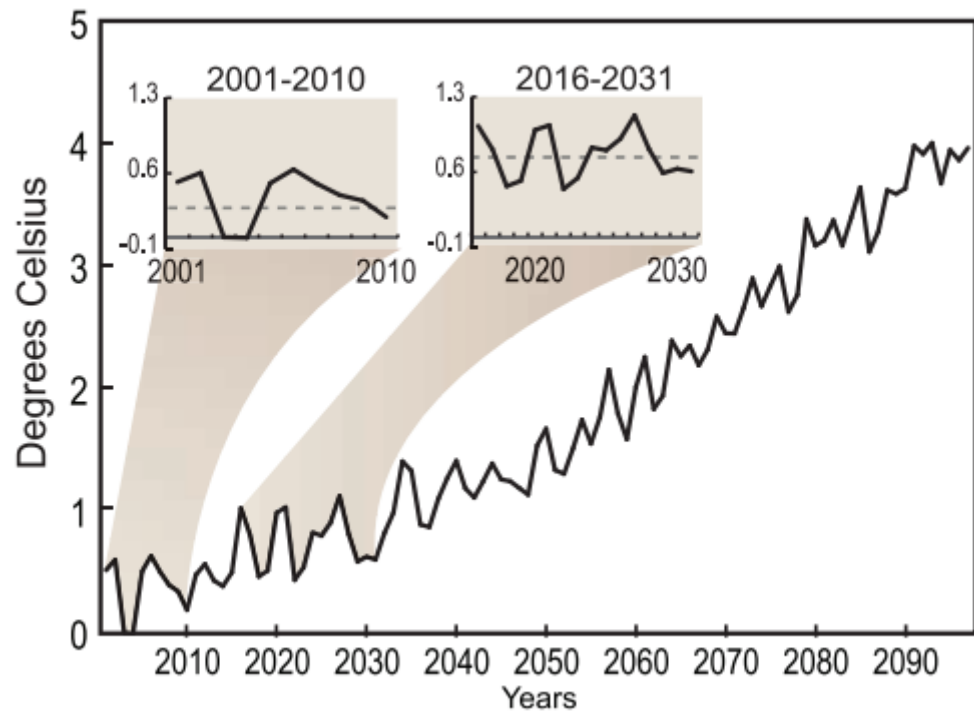
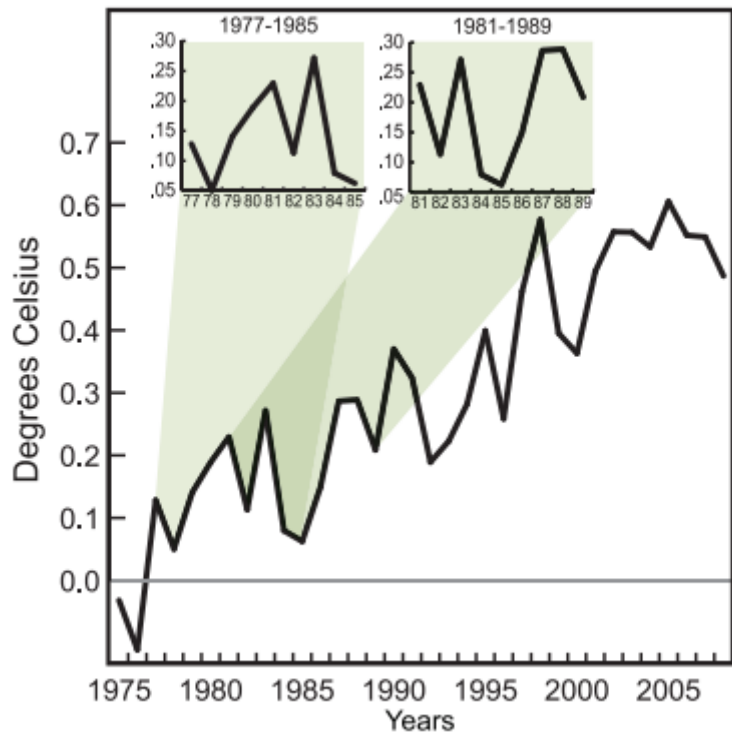
# Koniec globalnego ocieplenia?



Na podstawie argumentów czysto matematycznej natury (badanie synchronizacji szeregu naturalnych oscylacji klimatycznych - na górze), Swanson i Tsonis sugerują że w latach 2001/2002 nastąpiło załamanie trendu rosnącego temperatury.

Czy możemy się już cieszyć?

## ...ale czy na pewno?



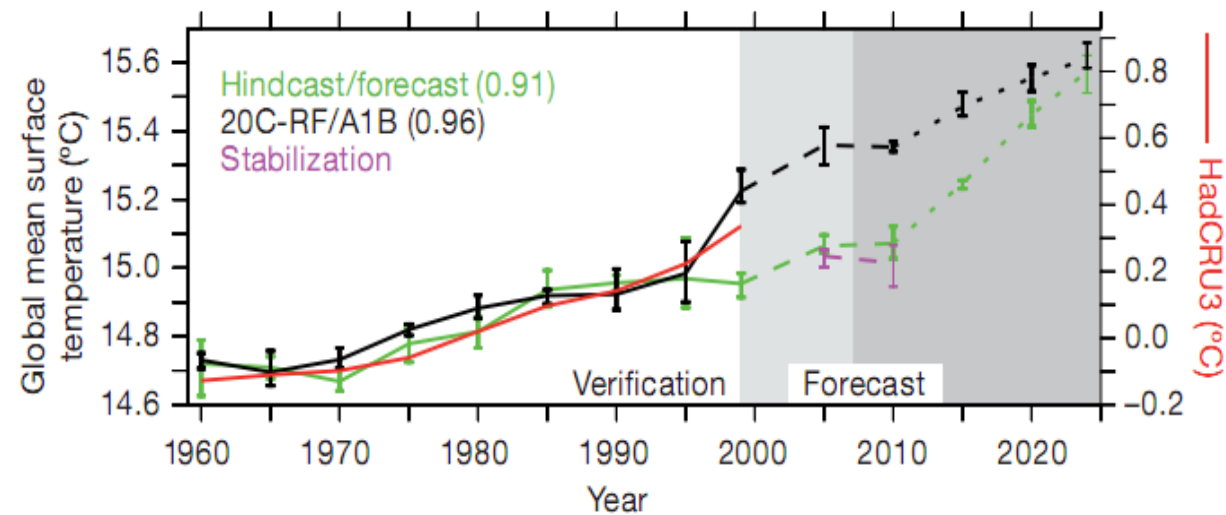
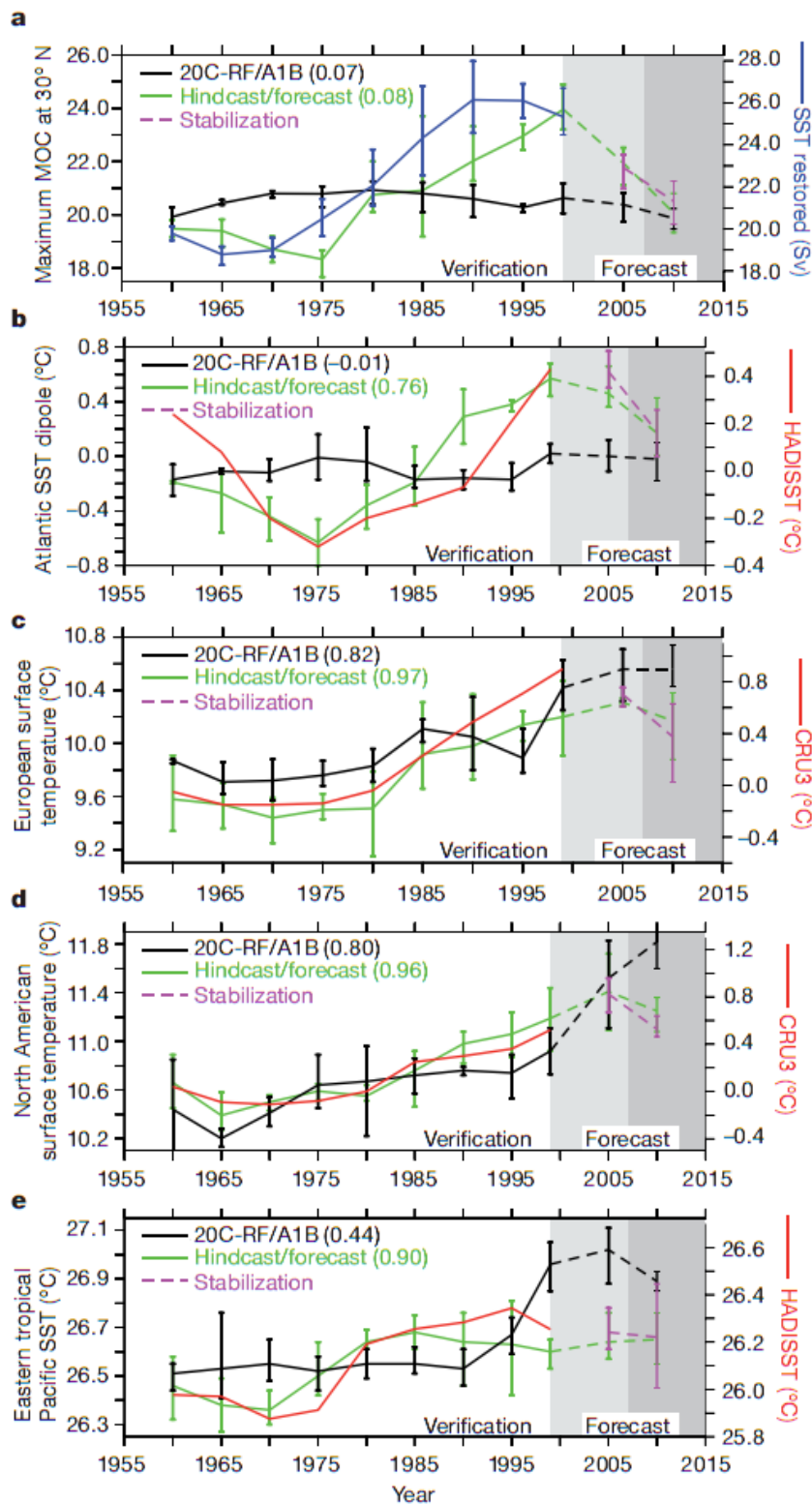
Tymczasem Easterling i Wehner przypomnieli że w ciągu ostatnich 34 lat szybkiego ocieplenia (1975-2008), oprócz 1998-2008 (okresu rozpoczętego bardzo ciepłym rokiem wyjątkowo silnego El Nino) były jeszcze dwa okresy (1977-1985 i 1981-1989) bez średniego wzrostu temperatury.

Także w wynikach modelowania klimatu XXI wieku widać takie okresy spowodowane naturalną zmiennością klimatu (i to pomimo że model nie zawierał zmian oświetlenia słonecznego lub wybuchów wulkanów).

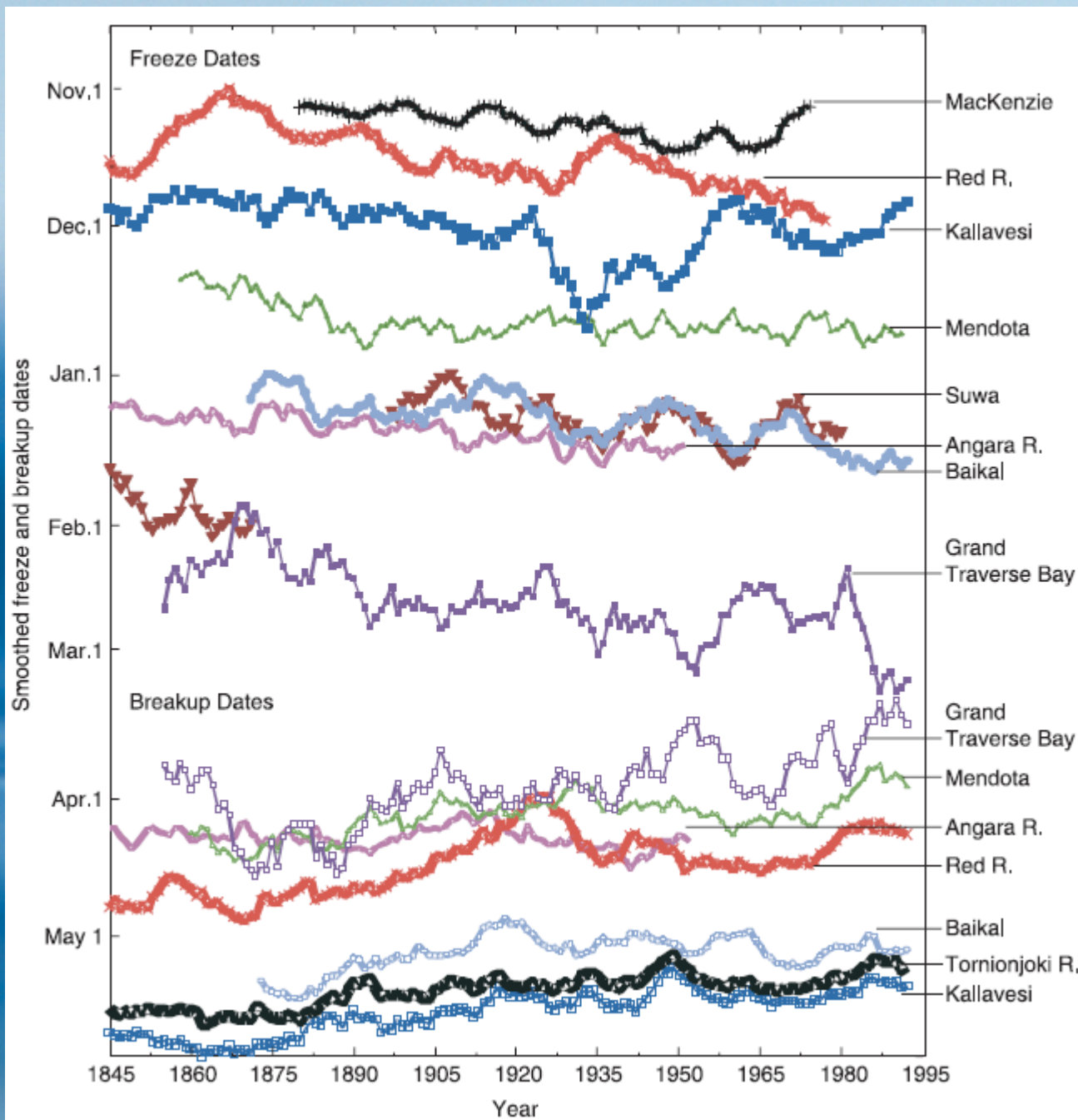
# To przepowiedziane...?

Jeśli uwzględnić właściwą fazę AMO w warunkach początkowych modelu (poprzez wartości temperatury powierzchniowej), można poprawić prognozy temperatury globalnej i regionalnej do 10 lat do przodu (przy zastosowaniu właściwych wymuszeń). Na rysunkach: **obserwacje**, **testowana metoda**, standardowa prognoza wg scenariusza A1B IPCC dla różnych regionów (po lewej) i dla świata (na dole).

*Ale czy prognoza standard. nie jest lepsza?*



# Jezióra i zatoki zamarzają na coraz krótszy czas

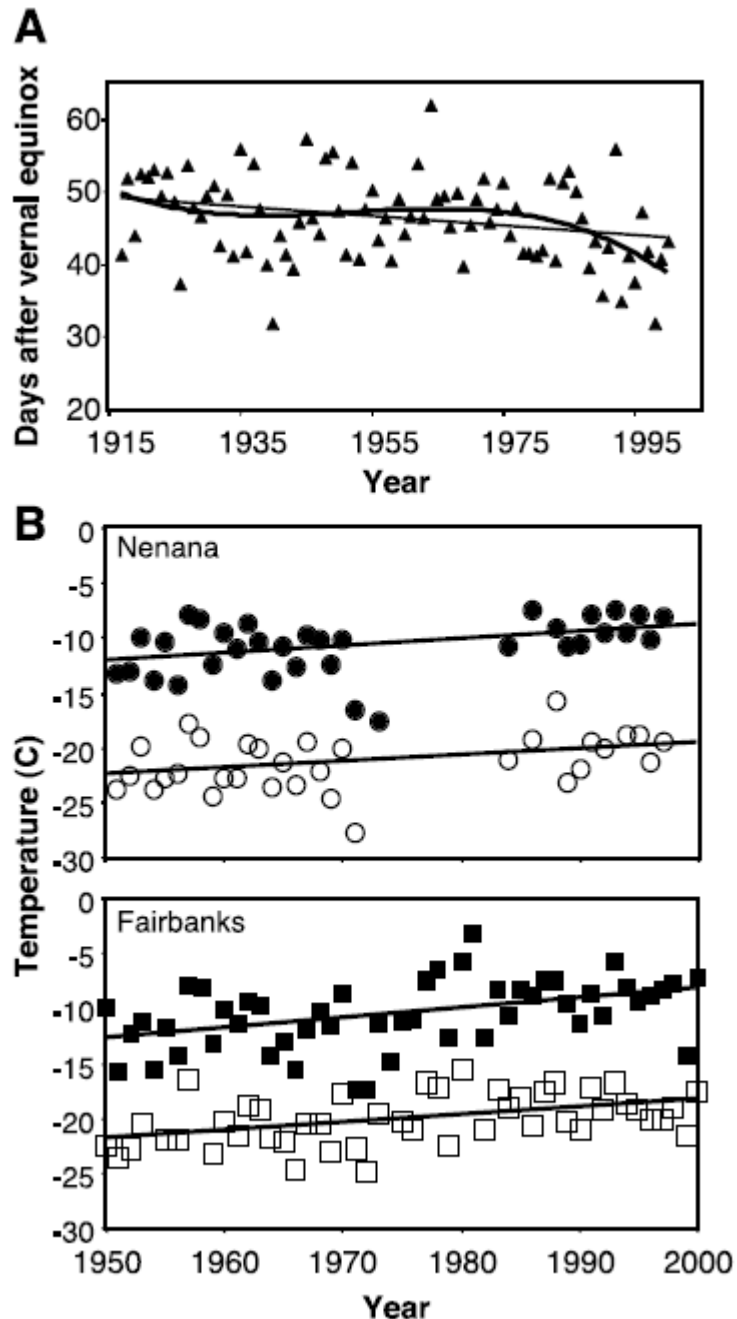


Zamarzanie (na górze) i rozmarzanie (na dole) jezior i rzek stanowi dobre źródło paleoklimatyczne ponieważ ludzie od wieków obserwowali te zjawiska z dużym zainteresowaniem. Na rysunku widoczny wyraźny trend do coraz krótszego czasu zamarzania zbiorników słodkowodnych półkuli północnej od połowy XIX wieku.

# Rzeki również...

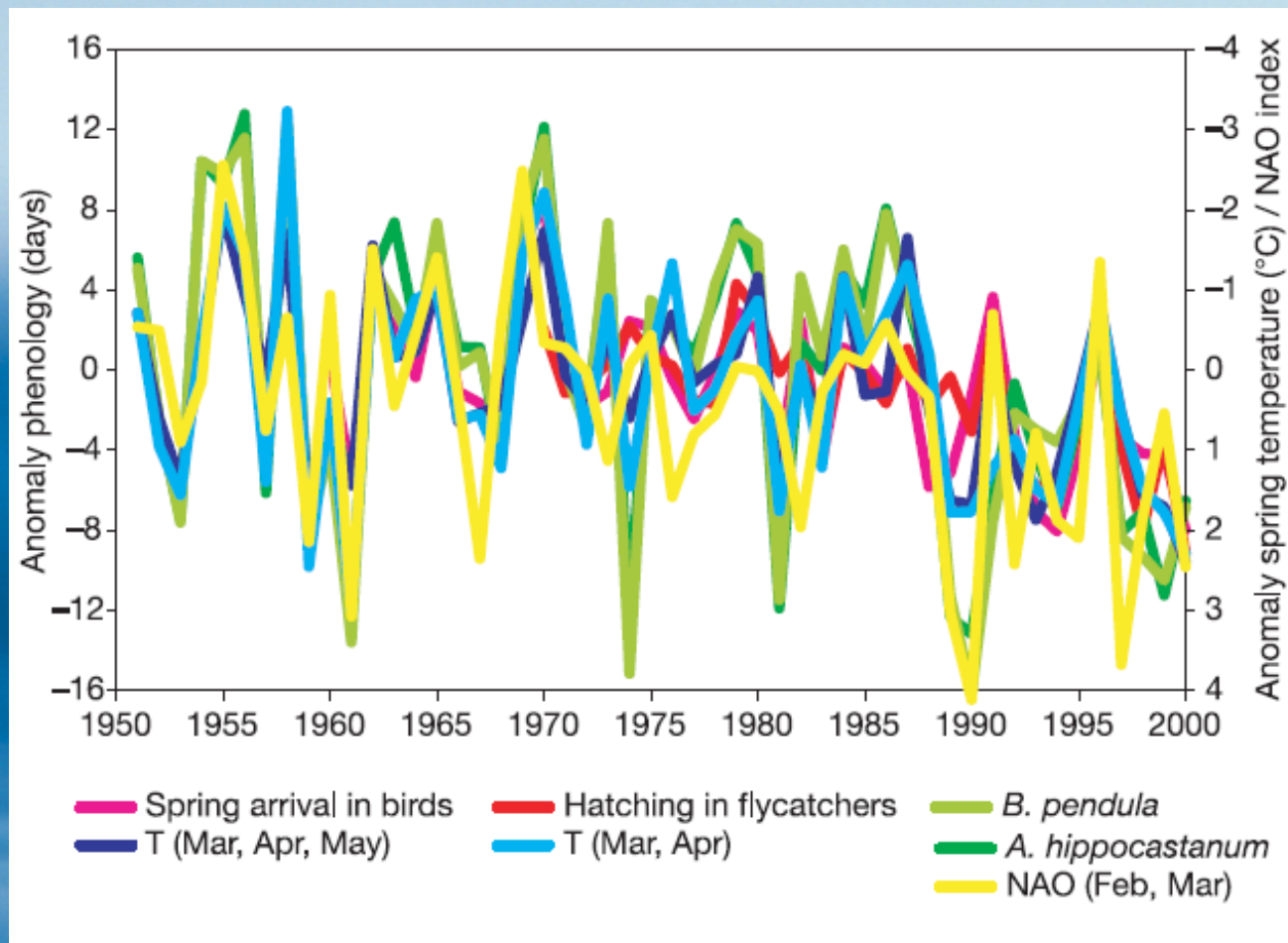
Przykład obserwacji daty rozmarzania rzeki dla celów pozanaukowych: w miejscowości Nenana (Alaska) na rzece Tenana od 1915 roku stawia się na lodzie drewniany trójnóg i obstawia datę jego wypadnięcia do wody.

Na rysunku data rozstrzygnięcia zakładu (w dnach po zrównaniu dnia z nocą), temperatury maksymalne i minimalne (I-IV) w Nenana i Fairbanks.



Dane tego typu, z dala od miast, są przydatne dla sprawdzenia czy obecne ocieplenie nie jest skutkiem “wysp gorąca” związanych z postępującą urbanizacją.

# Zmiany klimatu a przyroda Europy

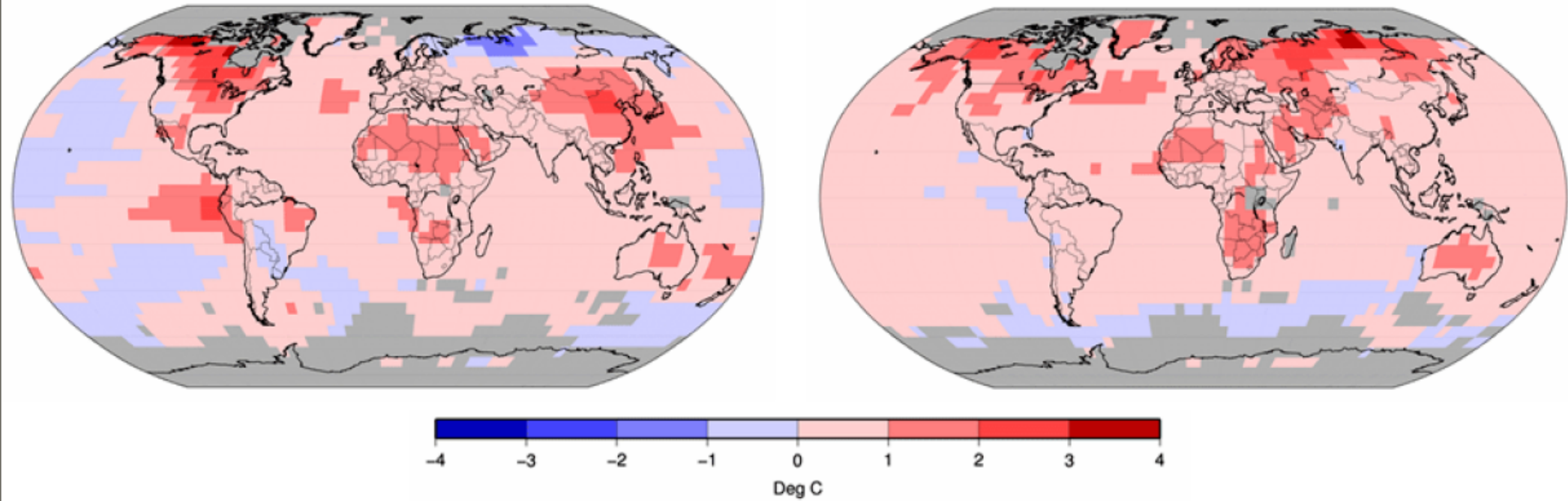


Zmiany w przyrodzie (na przykładzie Niemiec): daty przylotów ptaków na wyspę Helgoland, wylęg muchołówek żałobnych (*Ficedula hypoleuca*), pojawienie się liści brzozy (*B. pendula*) i kasztana (*A. hippocastanum*) korelują z temperaturą marca i kwietnia (niebieski) i indeksem NAO (żółty).


# Rekordowe lata: 1998 i 2005

1998

2005



Rekordowo ciepły rok 1998 związany był z silnym El Niño. W prawie równie gorącym roku 2005 anomalie temperatury były bardziej równomiernie rozłożone po całej kuli ziemskiej.

Arkansas Democrat  Gazette

## LETTERS

### Daylight exacerbates warning

You may have noticed that March of this year was particularly hot. As a matter of fact, I understand that it was the hottest March since the beginning of the last century. All of the trees were fully leafed out and legions of bugs and snakes were crawling around during a time in Arkansas when, on a normal year, we might see a snowflake or two.

This should come as no surprise to any reasonable person. As you know, Daylight Saving Time started almost a month early this year. You would think that members of Congress would have considered the warming effect that an extra hour of daylight would have on our climate. Or did they?

Perhaps this is another plot by a liberal Congress to make us believe that global warming is a real threat. Perhaps next time there should be serious studies performed before Congress passes laws with such far-reaching effects.

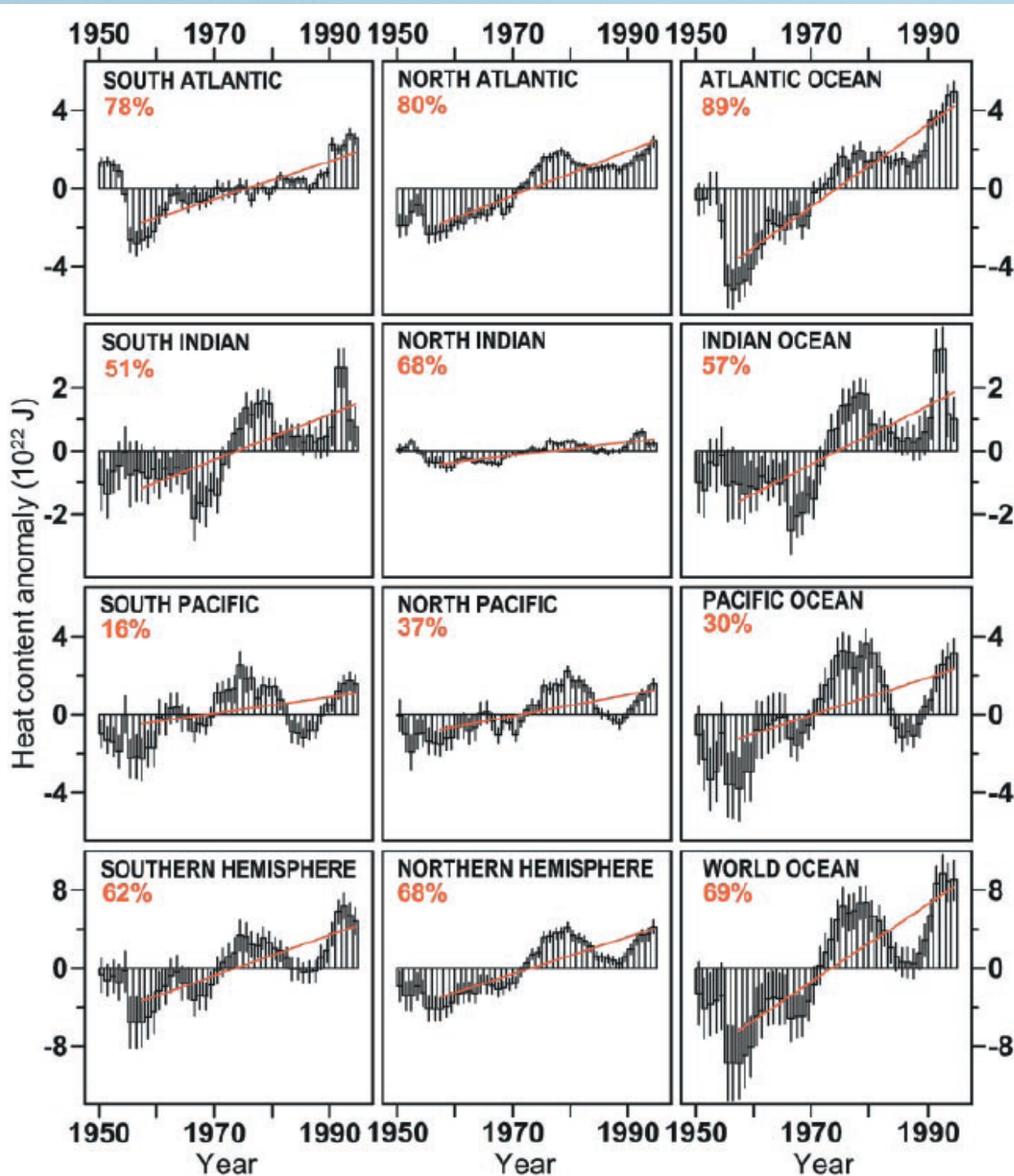
**CONNIE M. MESKIMEN**  
Hot Springs

Nadal nie wszystko co piszą gazety o klimacie ma sens

Nie jest na przykład prawdą, że przedłużenie w USA o miesiąc czasu letniego (jesienią 2006) spowodowało najgorętszą wiosnę w historii poprzez zwiększenie długości dnia.

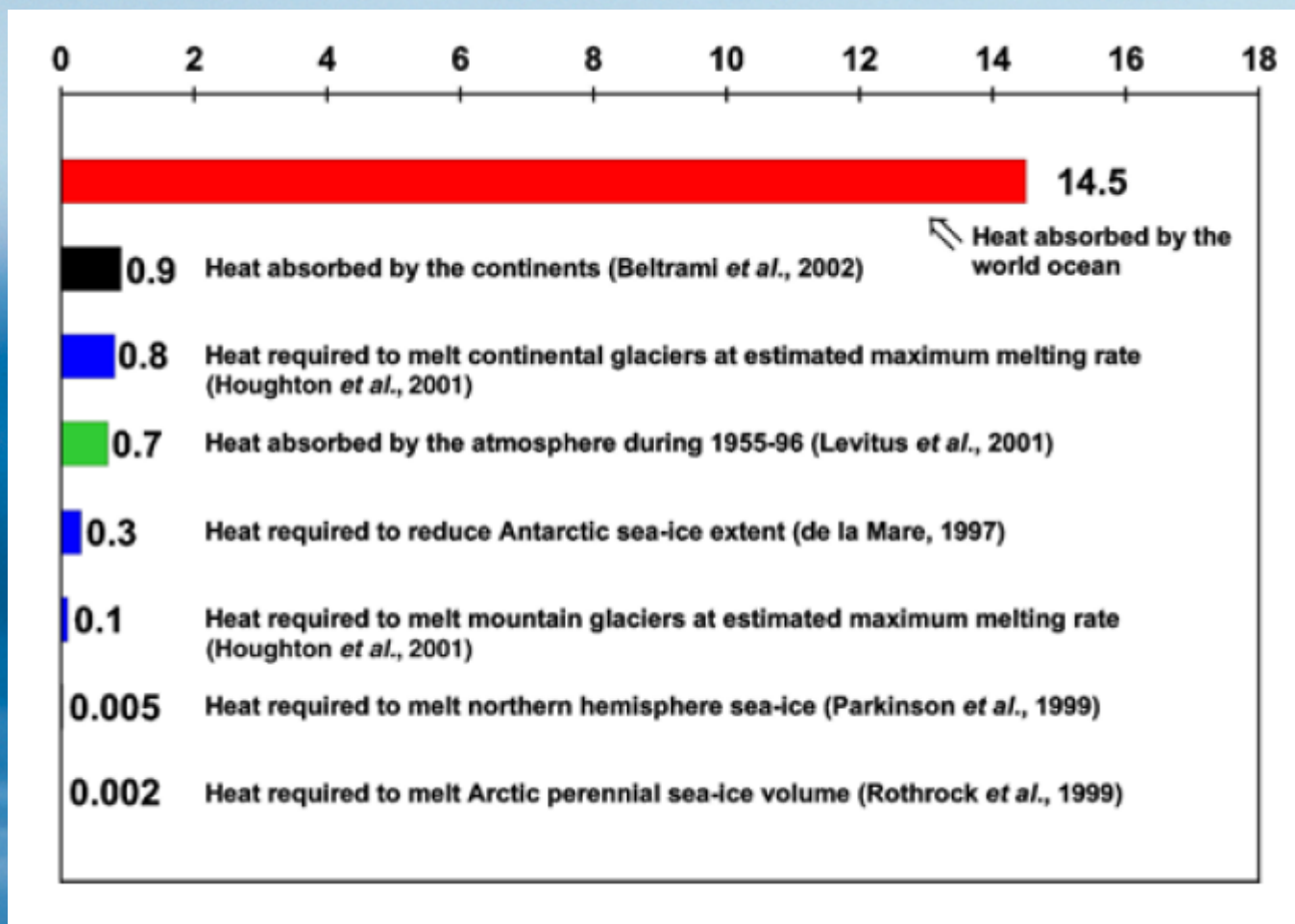
*List był oczywistym dowcipem. Natomiast fakt jego wydrukowania jest nieco niepokojący...*

# Ogrzewanie oceanów



Rysunek przedstawia zmiany energii cieplnej (stan wiedzy na rok 2000) poszczególnych akwenów oceanu światowego na podstawie dostępnej bazy danych profili CTD oraz liniowy trend zmian. Podane liczby oznaczają jaką część zmienności tłumaczy trend.

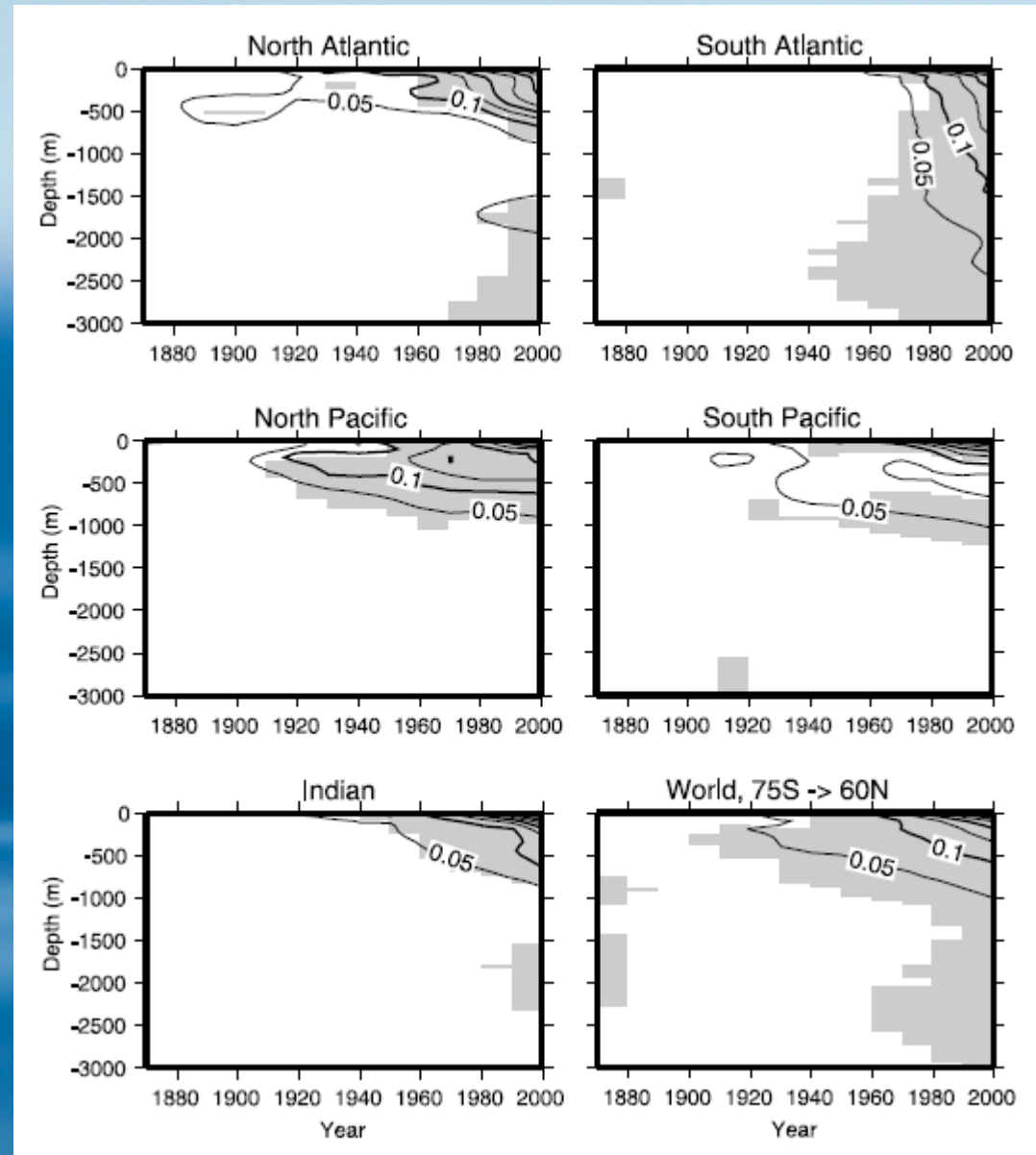
# Oceany głównym zbiornikiem absorbowanego ciepła



Próba zbilansowania ilości energii zmagazynowanej przez naszą planetę (jednostka:  $10^{22}$  J) w latach 1955-1998 wskazuje, że oceany zabsorbowały 84% całkowitej dawki, ląd 5%, atmosfera 4%. Pozostałe 7% to ciepło utajone stopionych lodowców i lodu morskiego.

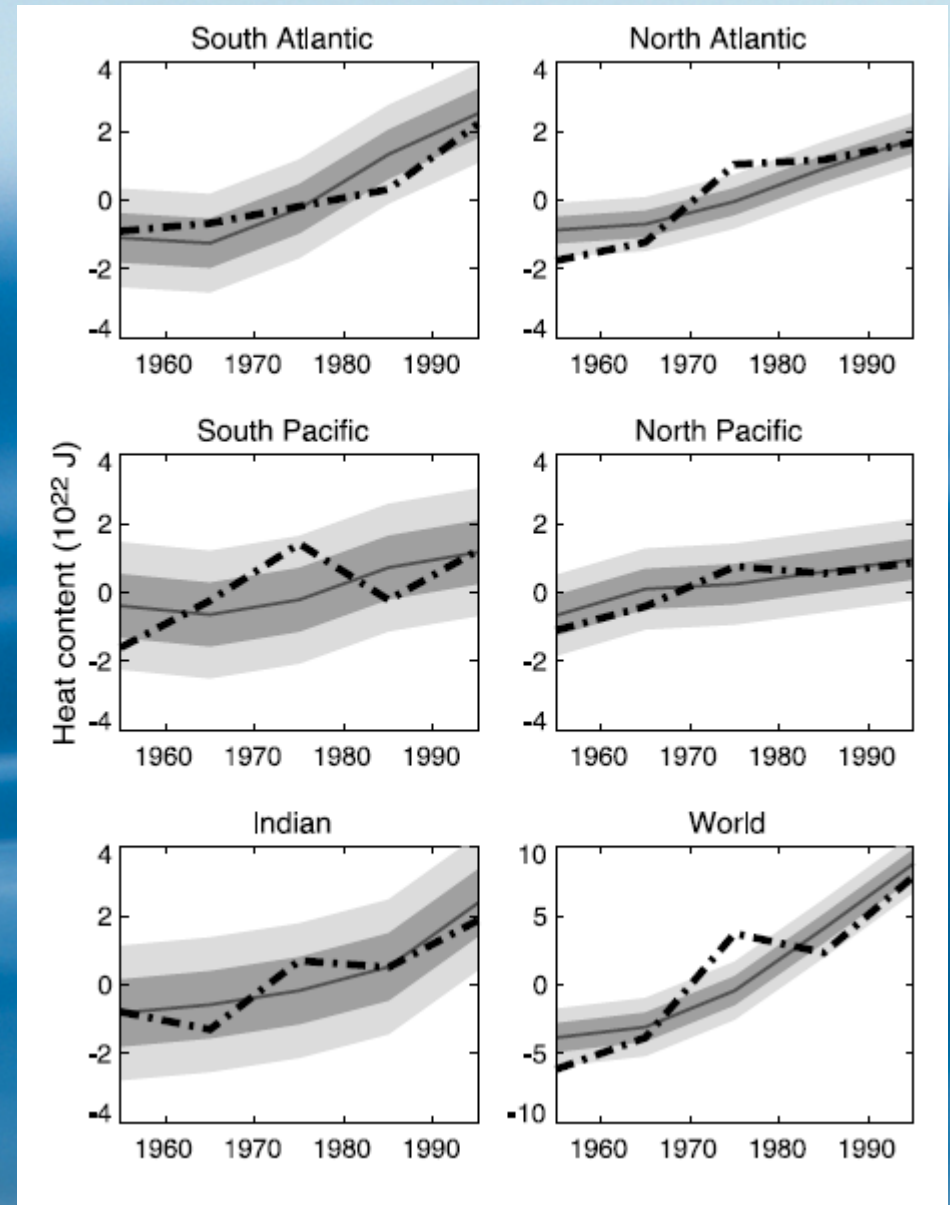
# Rozprzestrzenianie się ciepła w oceanach

Zmiany temperatury [K] w sześciu akwenach oceanicznych od 1870 r. - wyniki modelowania (PCM). Widoczne jest, że ciepło wnika do oceanu głównie na północnym i południowym Atlantyku, w wysokich szerokościach – dokładnie tam gdzie wytwarzane są wody głębinowe.



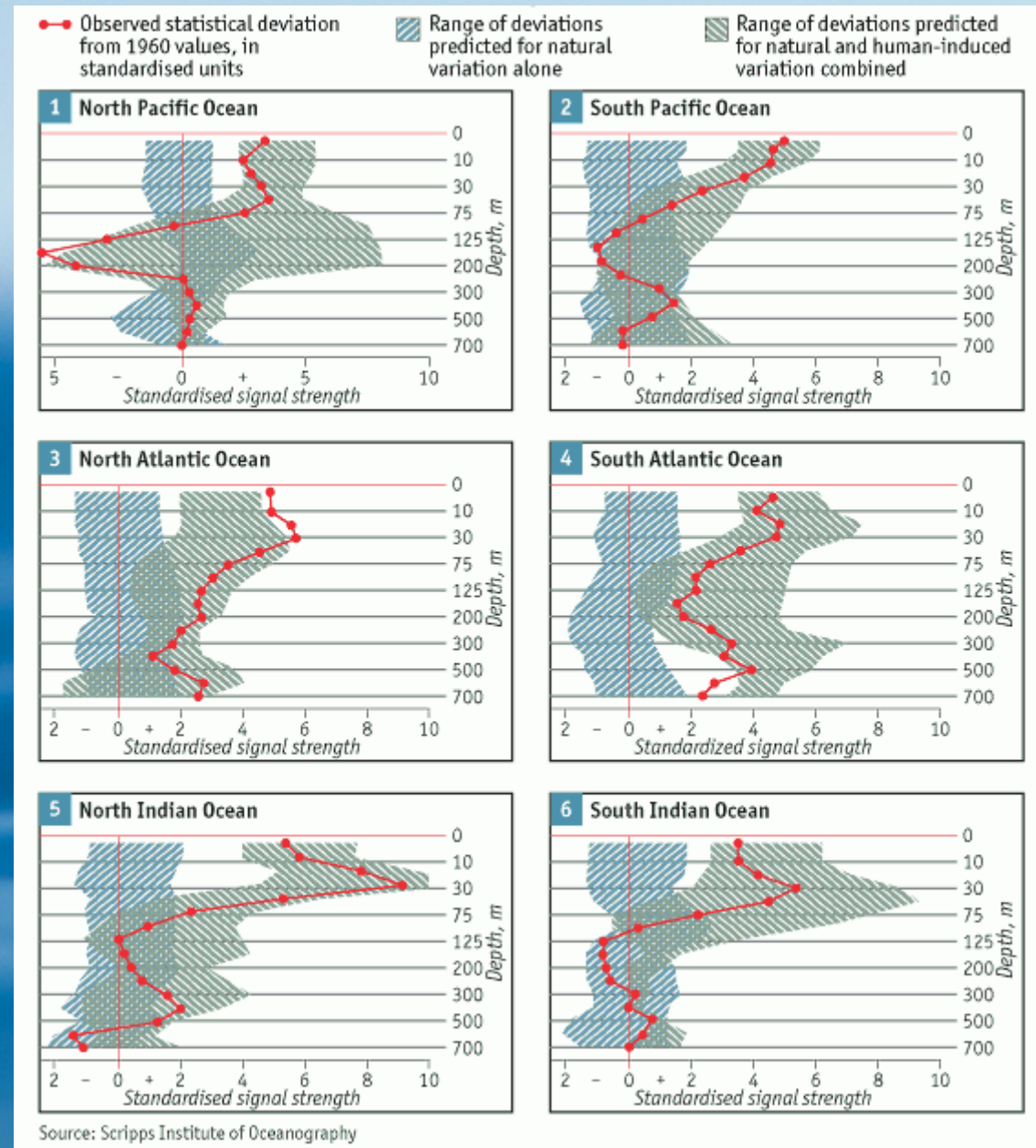
# Zgodność modelowania z danymi pomiarowymi

Zawartość ciepła akwenów oceanicznych z wyników pomiarów CTD (linia przerywana) oraz wielokrotnego (5 razy) modelowania (model PCM). Szare pasy oznaczają pojedyncze i podwójne odchylenie standardowe modelu.



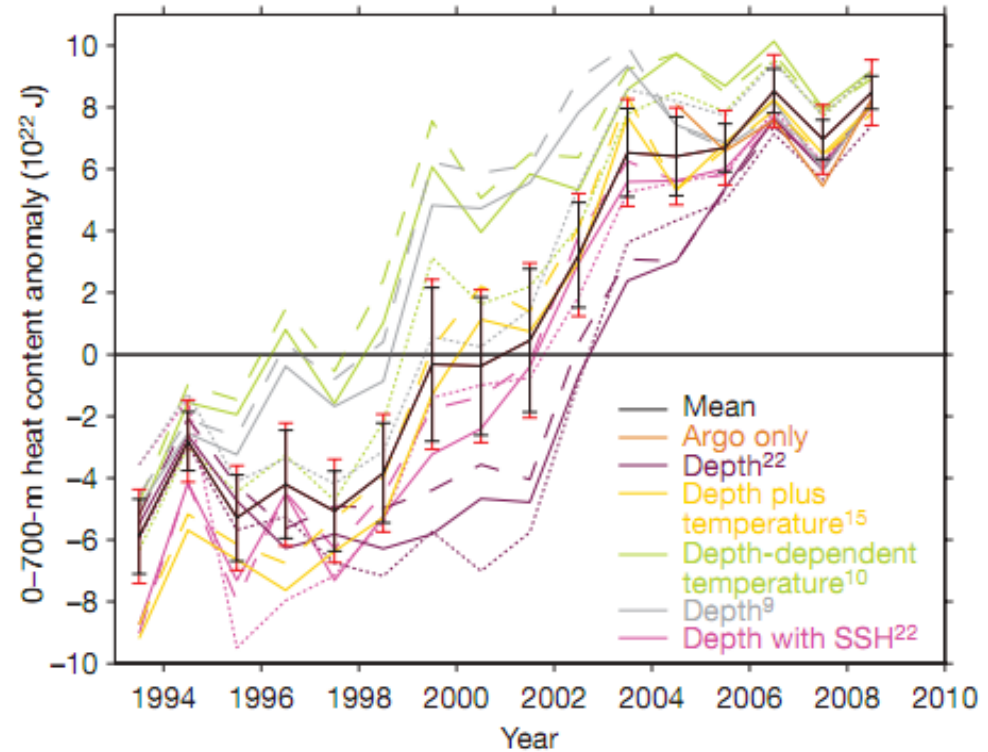
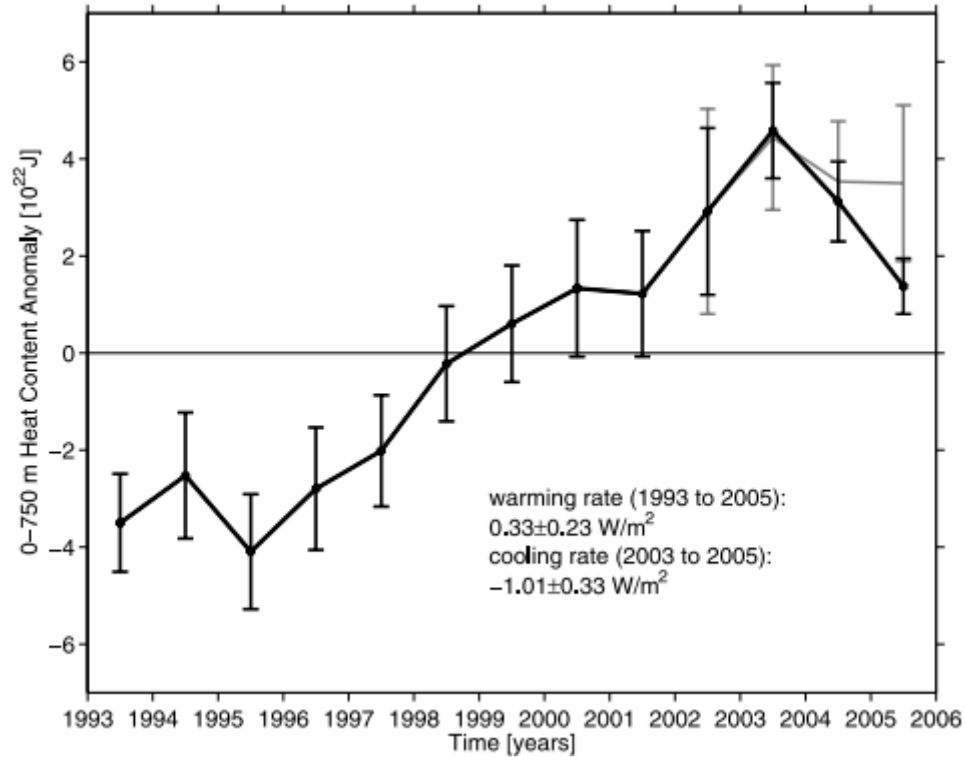
# Czy na pewno my grzejemy Ziemię?

Porównanie zmierzonych i modelowanych (PCM i HadCM3) 30-letnich zmian temperatury w różnych rejonach Oceanu Światowego wskazują, że naturalne zmiany klimatyczne (w tym stała słoneczna i wulkanizm) nie są w stanie wytłumaczyć obserwowanej zmienności. Natomiast gazy cieplarniane wyjaśniają ją z dokładnością do błędu użytych modeli.



Profile zmian temperatury dla sześciu akwenów (rysunek: *The Economist*, za T. P. Barnett et al., 2005, *Science*, 309, 5732, 284-287)

# Dwa poglądy na ocieplenie oceanu w ostatnich latach?



Dwa wykresy zawartości ciepła pierwszych 700 m oceanu. Zwraca uwagę spadek (oziębienie) w latach 2004-2006 na lewym wykresie oraz wzrost (choć wolniejszy niż trend) na prawym (czarna linia to średnia wielu pomiarów). Kim są strony tego sporu?

*Źródła (wyjątkowo) na następnej stronie*

# Otóż spór ma charakter wyjątkowo osobisty...

## **Recent cooling of the upper ocean**

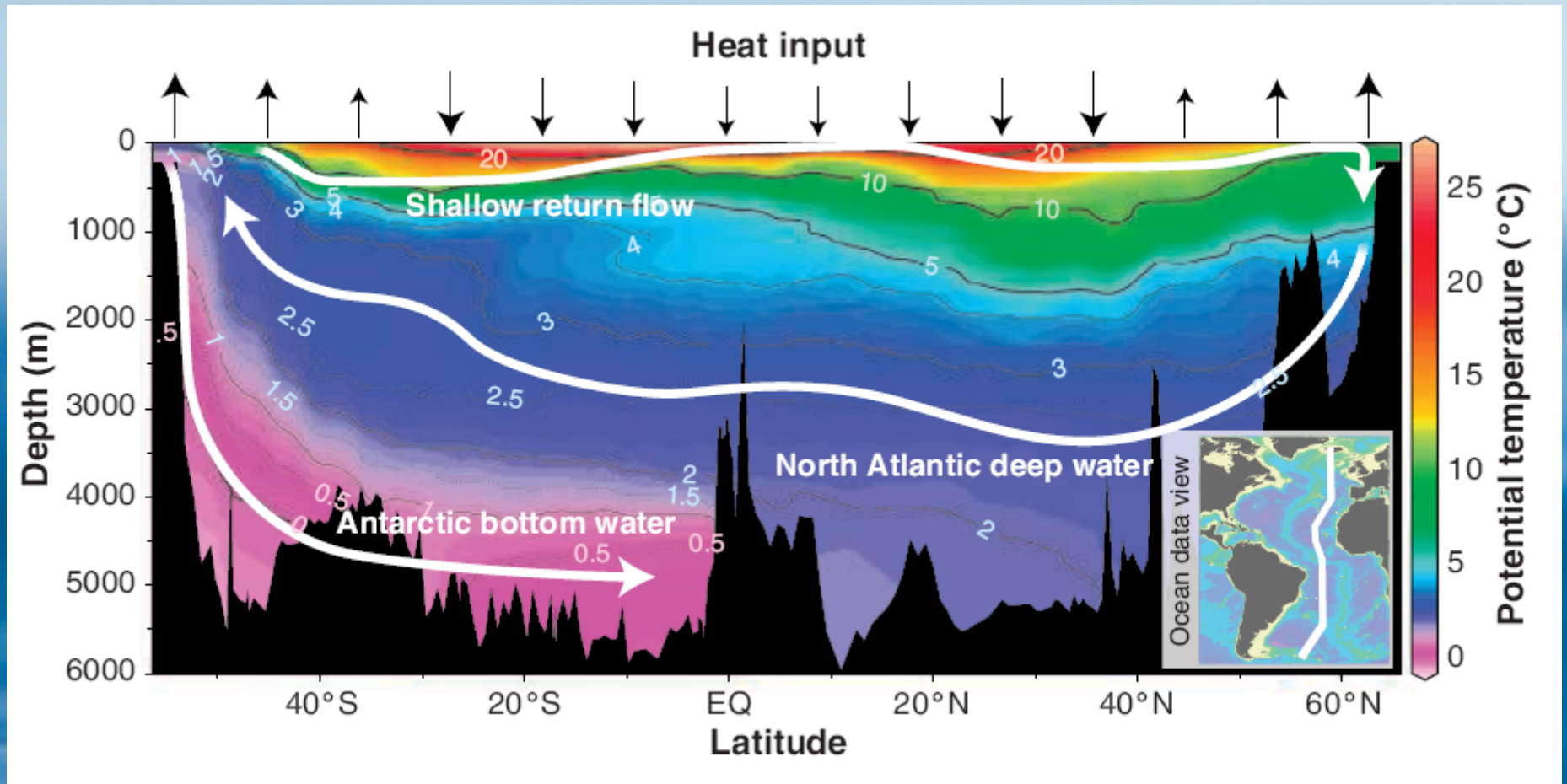
John M. Lyman,<sup>1,2</sup> Josh K. Willis,<sup>3</sup> and Gregory C. Johnson<sup>1</sup>

## **Robust warming of the global upper ocean**

John M. Lyman<sup>1,2</sup>, Simon A. Good<sup>3</sup>, Viktor V. Gouretski<sup>4</sup>, Masayoshi Ishii<sup>5,6</sup>, Gregory C. Johnson<sup>2</sup>, Matthew D. Palmer<sup>3</sup>, Doug M. Smith<sup>3</sup> & Josh K. Willis<sup>7</sup>

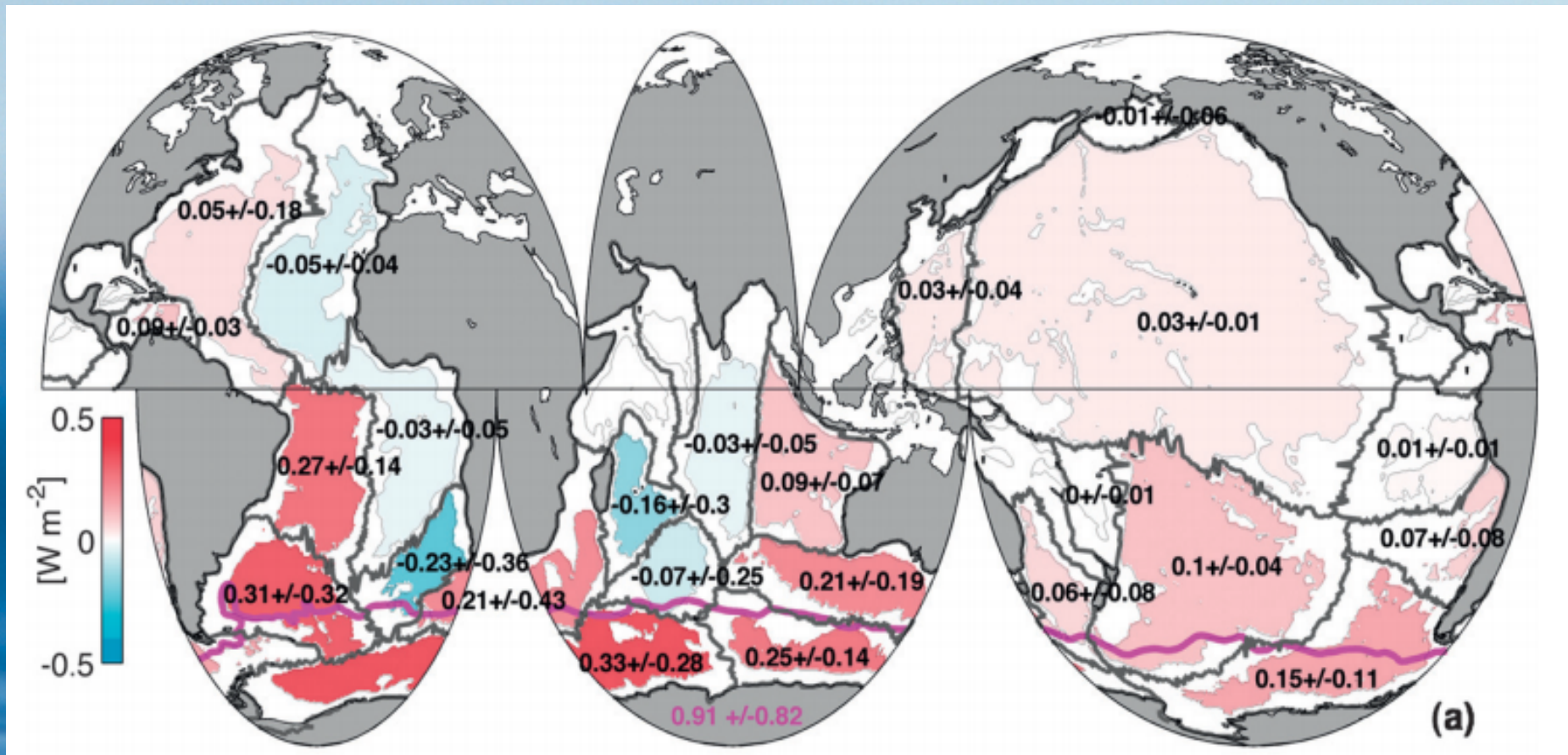
Oba artykuły pochodzą od tego samego zespołu autorów (jedynie poszerzonego w drugim przypadku). Przyczyną ich zmiany zdania między rokiem 2006 a 2010 jest zrozumienie, że dominujące dawniej pomiary jednorazowymi sondami STD zawyżały nieco temperaturę oceanu (m. in. Spadając wolniej niż podawali producenci), a pływaki ARGO miały zauważony dopiero niedawno błąd w przeciwną stronę (zaniżały temperatury).

# Przenikanie ciepła do oceanu



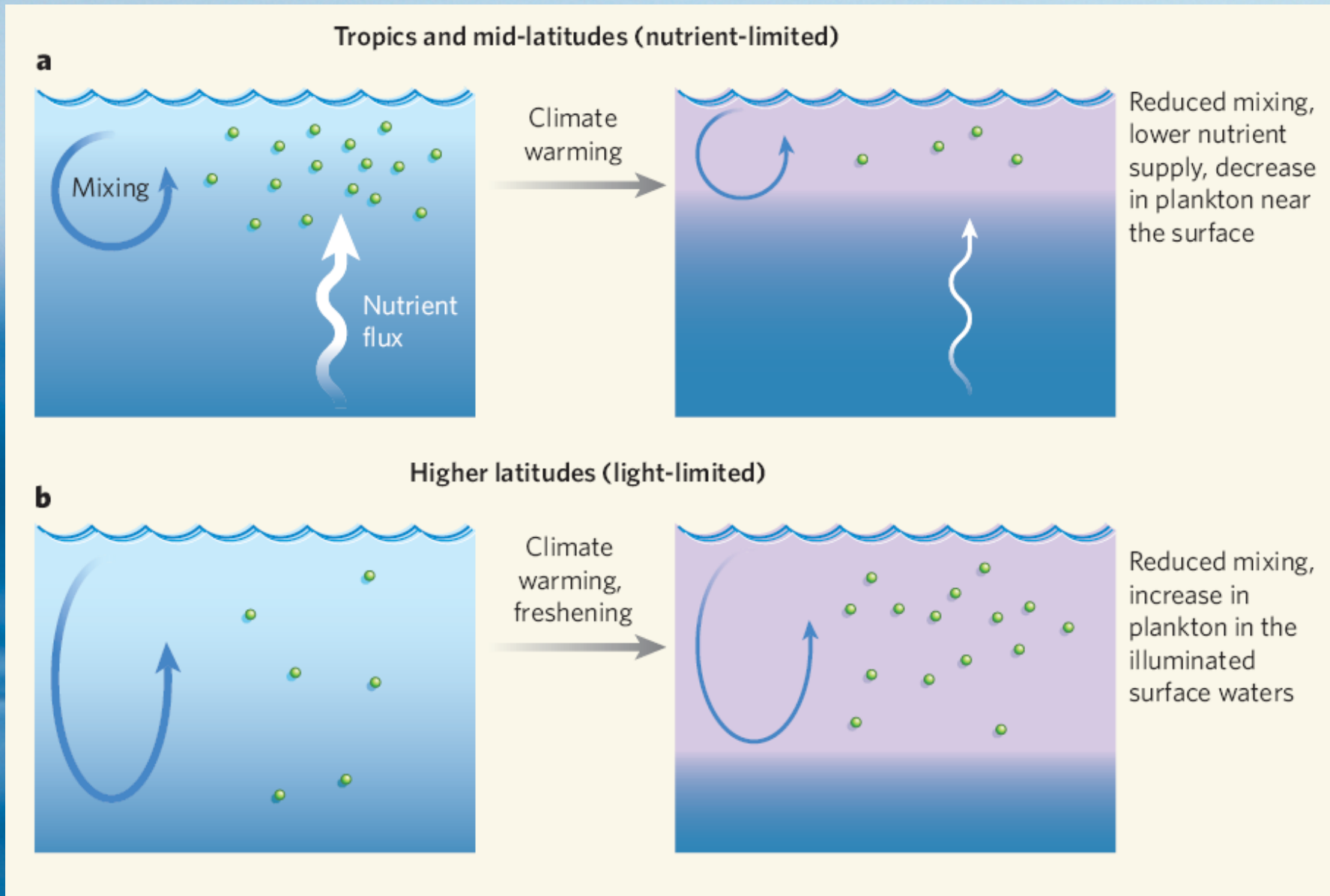
Ciepło przenika do oceanu (strzałki w dół) głównie w niskich szerokościach. Jego wnikanie w głąb oceanu utrudnione jest przez to że ciepła woda lżejsza jest od zimnej stratyfikacja. W wyniku tego zwiększone ciepło wnika do oceanu paradoksalnie przez zmniejszenie strumienia wypływającego do atmosfery (strzałki w górę) w wysokich szerokościach.

# Przenikanie ciepła do głębokiego oceanu



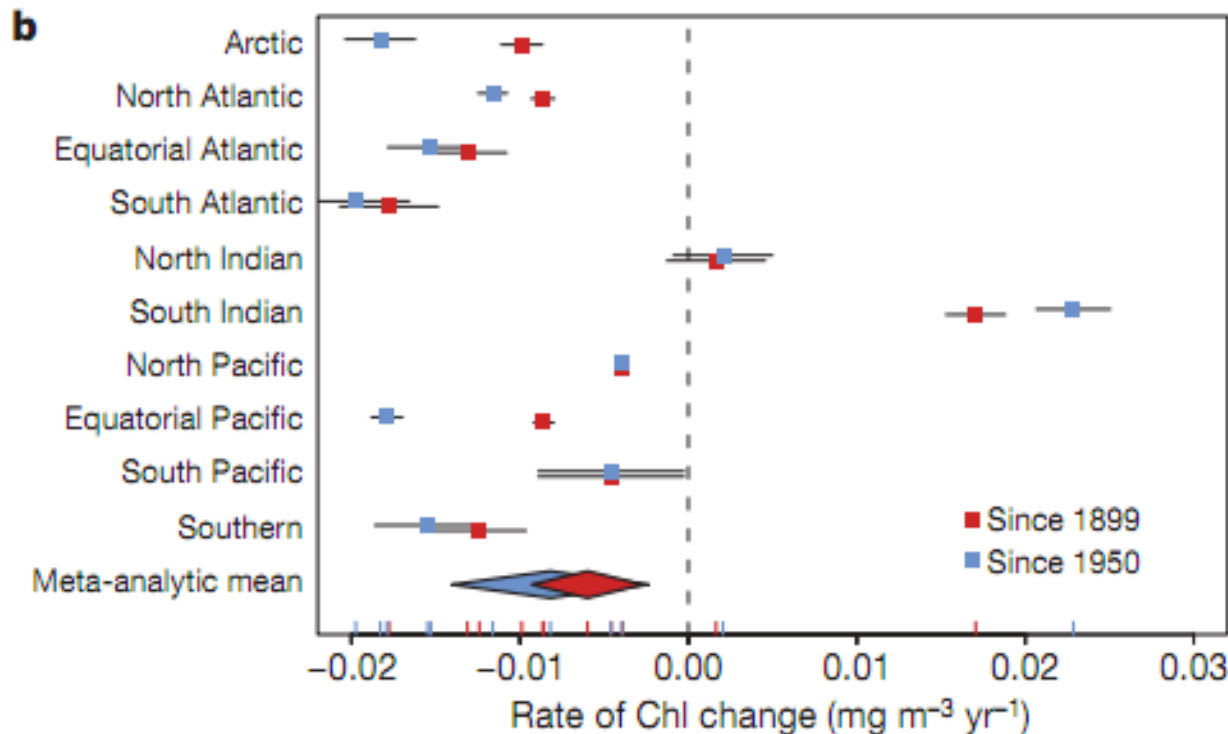
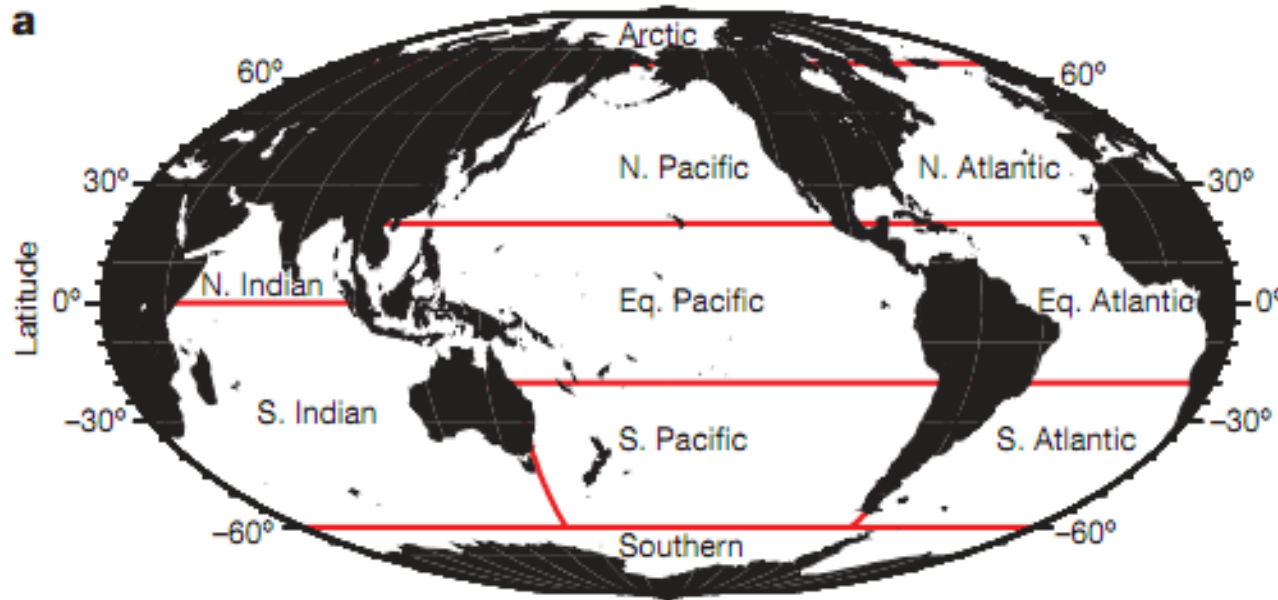
Wykres pokazuje strumienie ciepła poprzez poziom 4000 m (dodatnie w dół) oraz strumień przez 1000 m (kolor fioletowy dla obszaru Oceanu Południowego odgraniczonego fioletową linią). Strumienie wyliczono z podnoszenia się lokalnego poziomu morza względem średniej światowej i po uwzględnieniu ocieplenia się oceanu powyżej 4000 m.

# Jak to wpłynie na życie w morzu?



Zwiększona stratyfikacja spowodowana ociepleniem warstw powierzchniowych spowoduje zmniejszenie produkcji pierwotnej w tropikach i średnich szerokościach. Jedynie w morzach polarnych może się ona zwiększyć.

# Czy już to wpływa na życie w morzu?



Jeśli wierzyć długim seriom czasowym pomiarów optycznych przezroczystości wody morskiej (także krążki Secchiego), w większości akwenów oceanu (z wyjątkiem Oceanu Indyjskiego) już maleje koncentracja fitoplanktonu, a zatem i produkcja pierwotna. Co ciekawe wbrew poprzedniemu slajdowi także w Arktyce.

Tylko czy te stare pomiary są rzeczywiście porównywalne z dzisiejszymi?

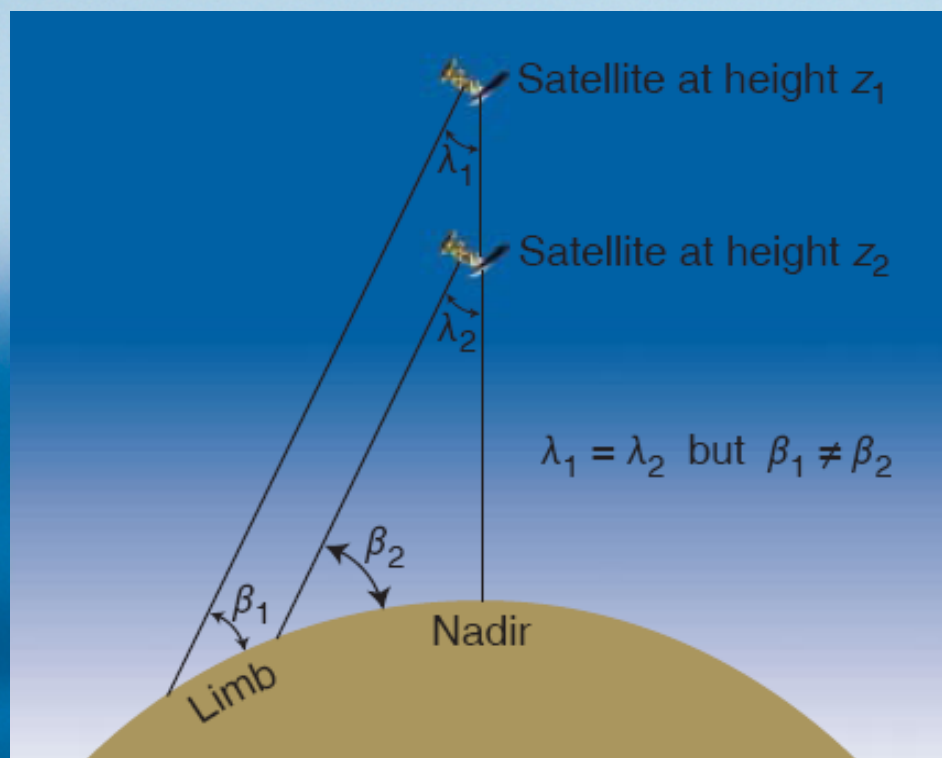
# Podsumowanie 1/3

- Jeszcze 35 lat temu nie było jasne czy świat zmierza ku globalnemu oziębieniu czy ociepleniu.
- Od tego czasu trwa największe i najszybsze ocieplenie od paruset lat (a być może od kilku tysięcy), jak dotąd o około 0.5 °C.
- Ocieplenie to nie ogranicza się do terenów zurbanizowanych – daje się wykryć także w zapisach instrumentalnych i zjawiskach przyrodniczych daleko od cywilizacji.
- Największe ocieplenie notuje się w obszarach polarnych (Arktyce i Półwyspie Antarktycznym) oraz na półkuli północnej zimą.
- Także oceany nagrzewają się, przyjmując prawie 90% energii akumulowanej przez Ziemię w wyniku ocieplenia.
- Sposób w jaki ocieplają się oceany daje się odtworzyć w modelach klimatycznych poprzez wymuszone antropologiczne (gazy cieplarniane i aerozol), nie daje się natomiast przez wymuszenie naturalne (zmienna aktywność słońca i wulkanizm).



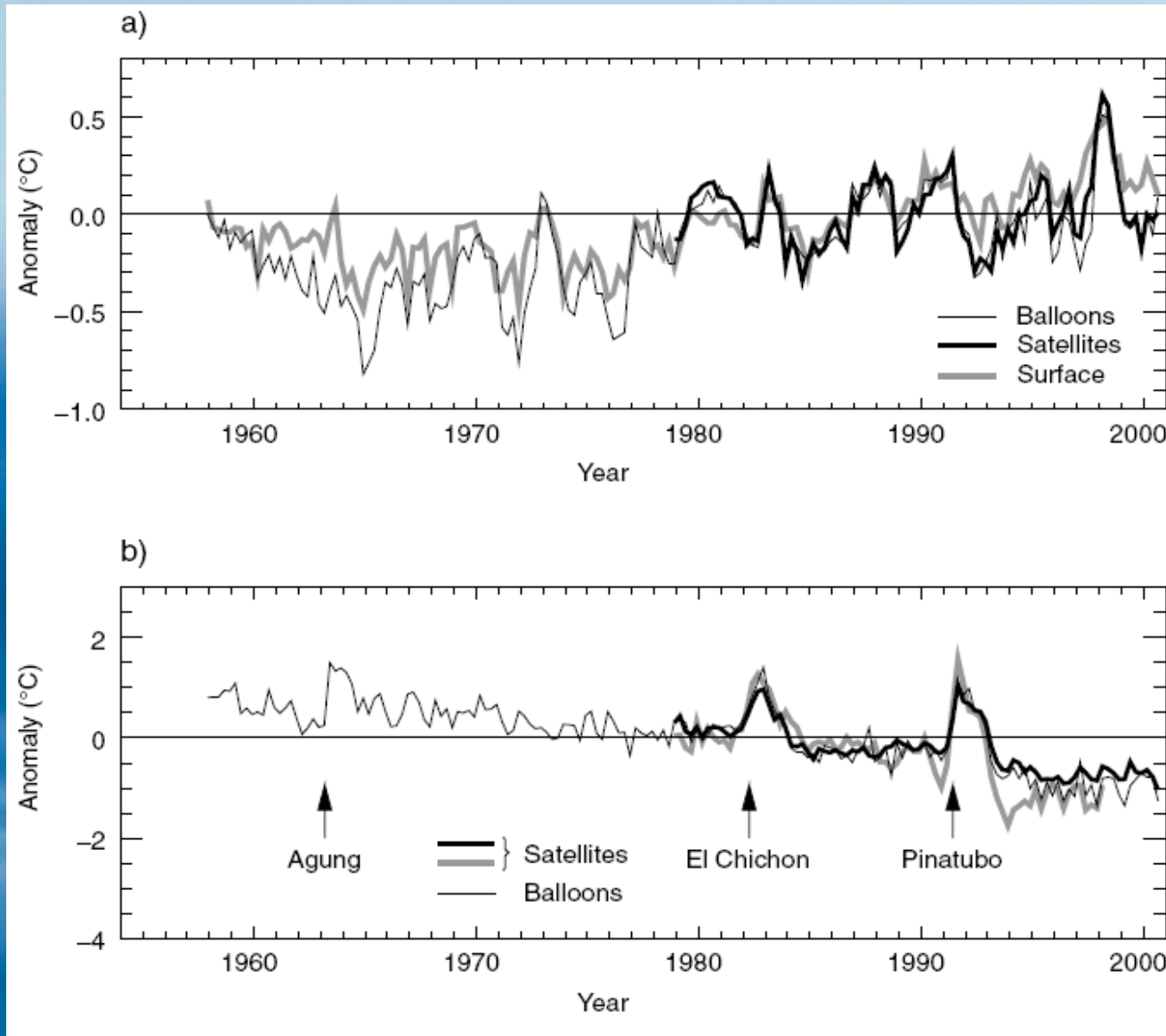
*Mucხოტოვკა ჯაღობნა –  
ჟიwy დოვოდ ციეპლენია კლიმატუ?*

# Różnice wyników między pomiarami naziemnymi a satelitami



Do roku 1998 pomiary satelitarne NOAA nie potwierdzały trendu rosnącej temperatury dolnej troposfery (< 15 km). Przyczyną okazały się rosnące z czasem błędy używanej metody korekcji czujników (Spencer & Christy 1990), posługującej się różnicą pomiędzy sygnałem podczerwonym w pionie i pod kątem. Nie uwzględniono faktu, że pod wpływem oporu powietrza orbita satelity obniża się i ten sam kąt wobec pionu oznacza inną grubość optyczną atmosfery. Po korekcji tego błędu pomiary satelitarne potwierdziły rosnący trend temperatury dolnej troposfery.

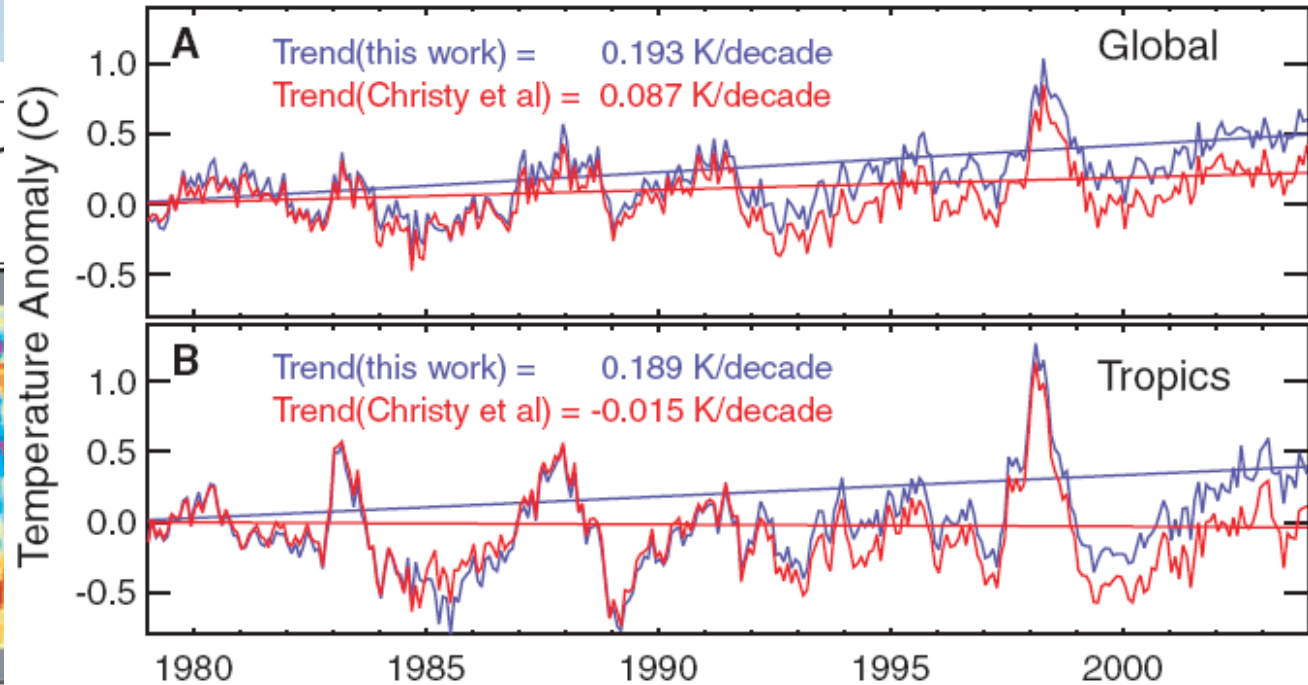
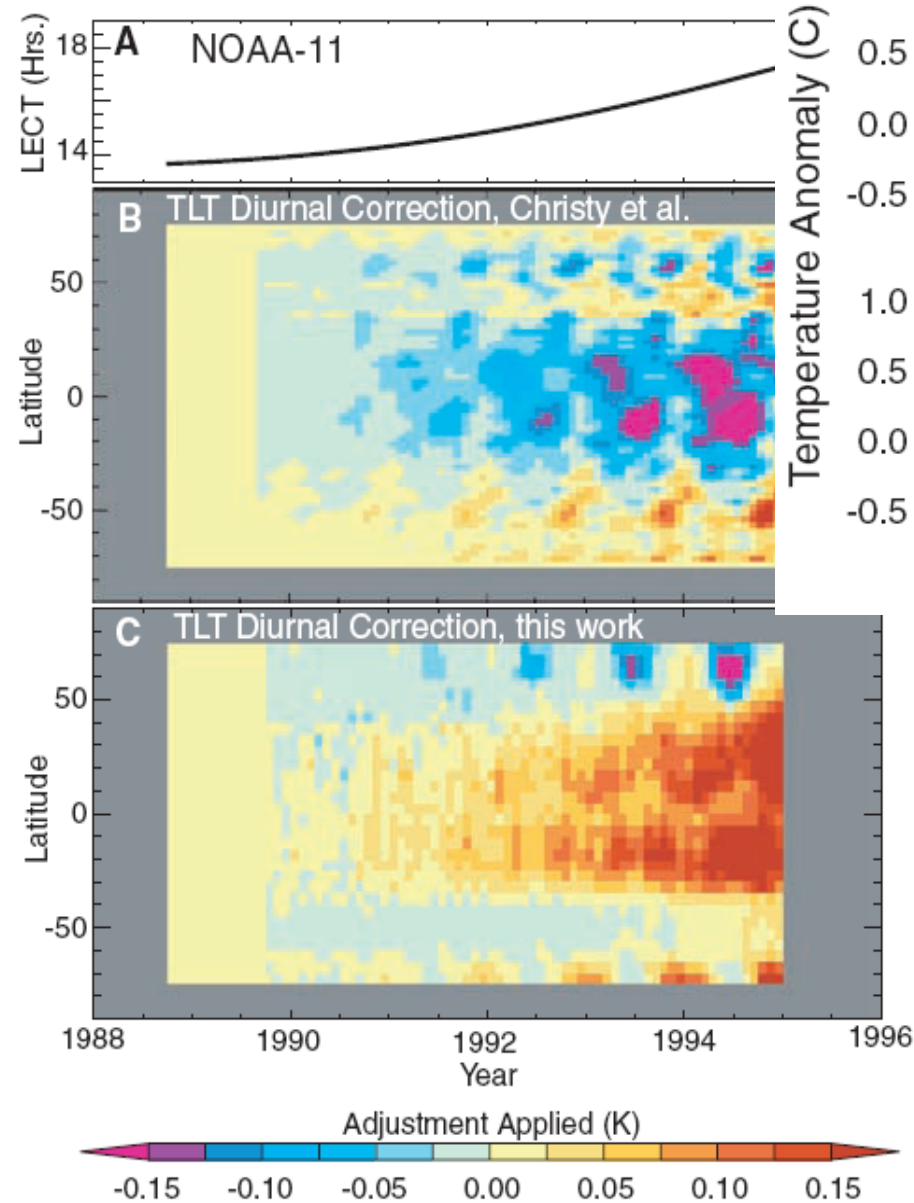
# Rok 2001: ciągle rozbieżności dla troposfery



Dlaczego pomiary naziemne, satelitarne i z balonów meteorologicznych pokazywały różne trendy dla troposfery (górną)? Wyniki stratosferyczne zmieniały się podobnie (oziębienie spowodowane m.in. ubytkiem ozonu).

# Dalsze poprawki algorytmów

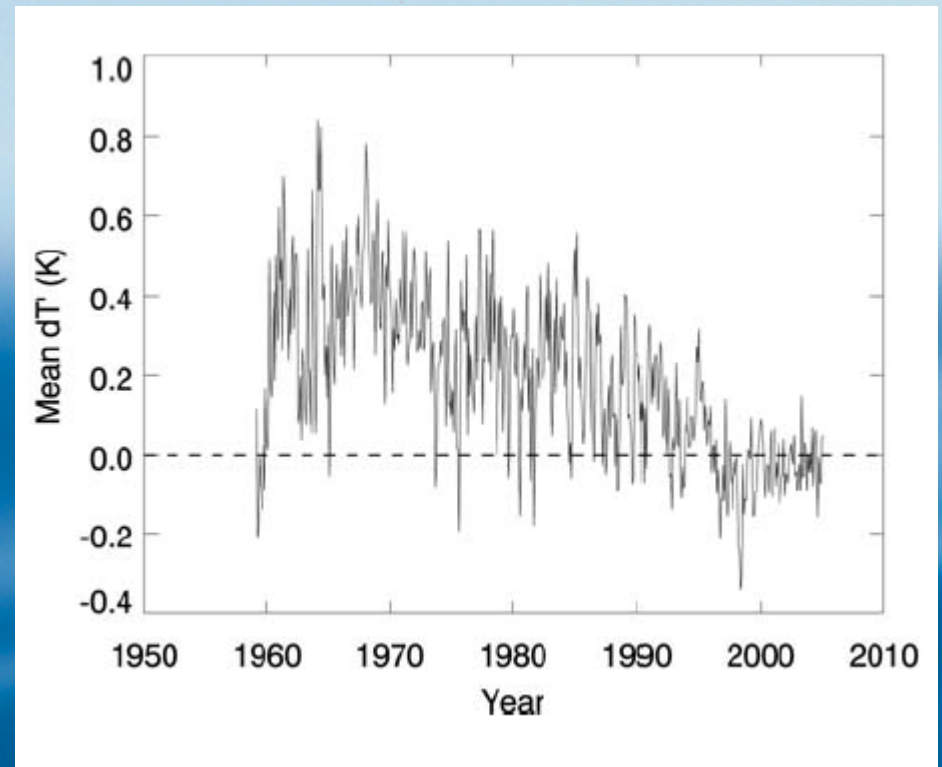
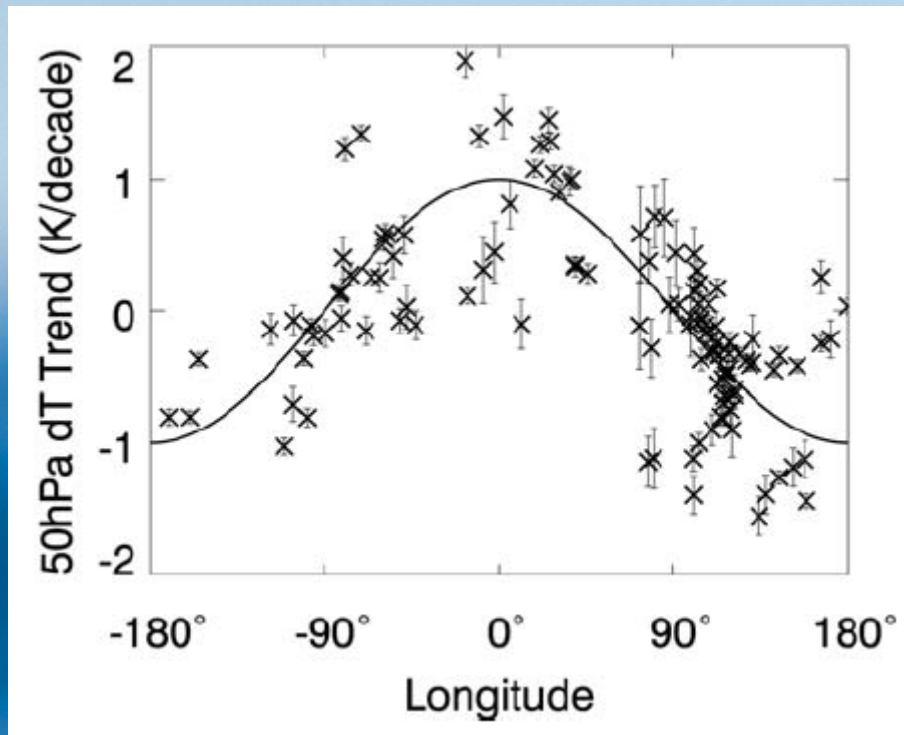
“We question why Christy and Spencer adopted an obviously wrong diurnal correction in the first place” Mears & Wentz 2005



W 2005 r. Mears & Wentz zauważyli, że jedna z poprawek wprowadzona przez Christy'ego po 1998 roku ma zły znak (po lewej), korygując zmieniający się sygnał temperatury w dół, zamiast w górę. Po skorygowaniu trendu dla dolnej troposfery, uzyskane zgodny z pomiarami naziemnymi wzrost temperatury w tropikach.

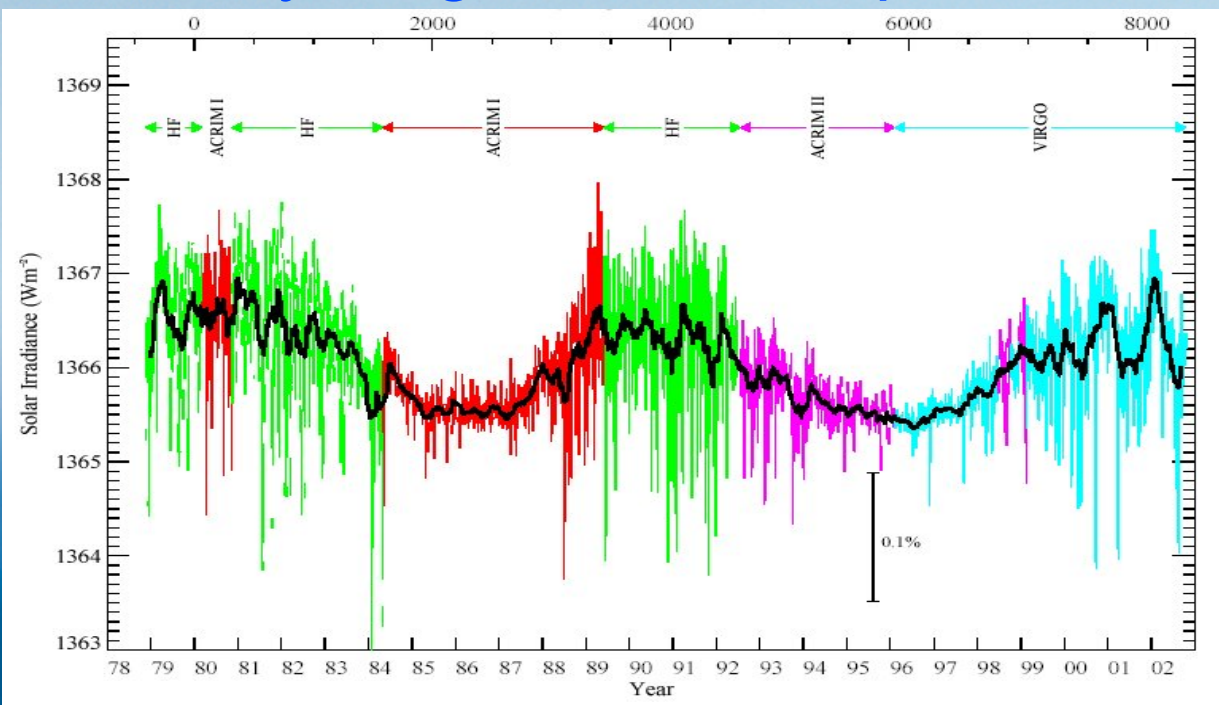
*Mears & Wentz 2005 (Science)*

# Balony meteorologiczne też miały problemy

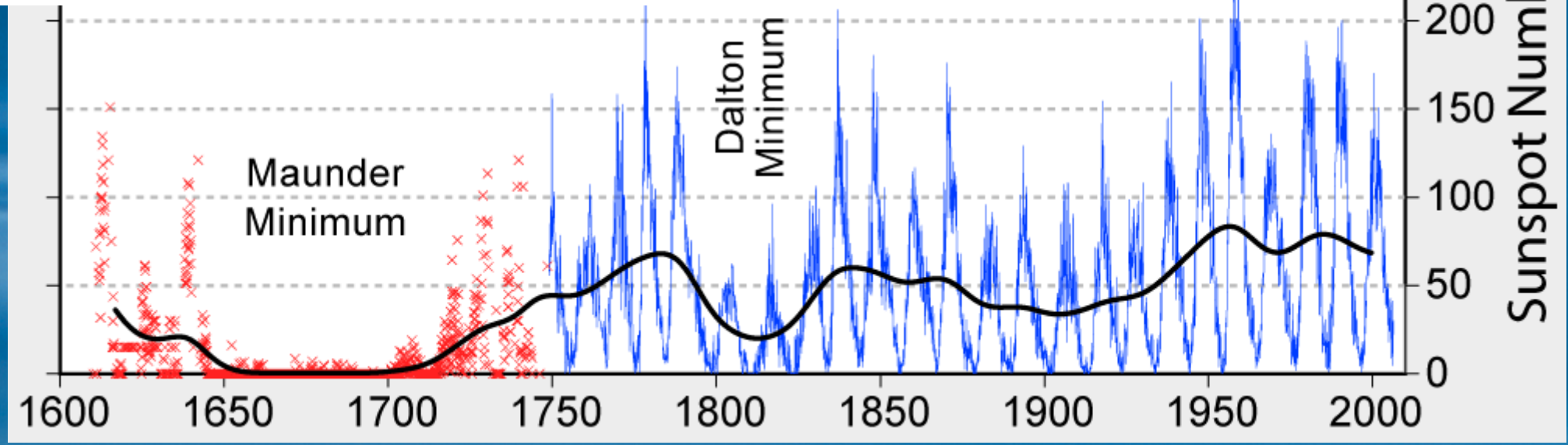


Także w 2005 roku zauważono, że balony meteorologiczne mające problemy z ogrzewaniem się czujników temperatury (po lewej zależność różnicy dziennoc w funkcji długości geograficznej wskazująca na sinusoidę błędu spowodowaną różnicą czasu lokalnego i GMT dla wysokości 50 hPa) z czasem miały coraz mniejszy błąd w wyniku lepszej izolacji czujników (po prawej wartości różnicy dobowej dla stacji tropikalnych na wysokości 300 hPa), a nie było to korygowane w publikowanych danych. Korekcja zmieniała trend temperatury w stacjach tropikalnych o około 0.1 K/dekadę.

# Czy za globalne ocieplenie nie odpowiada Słońce?

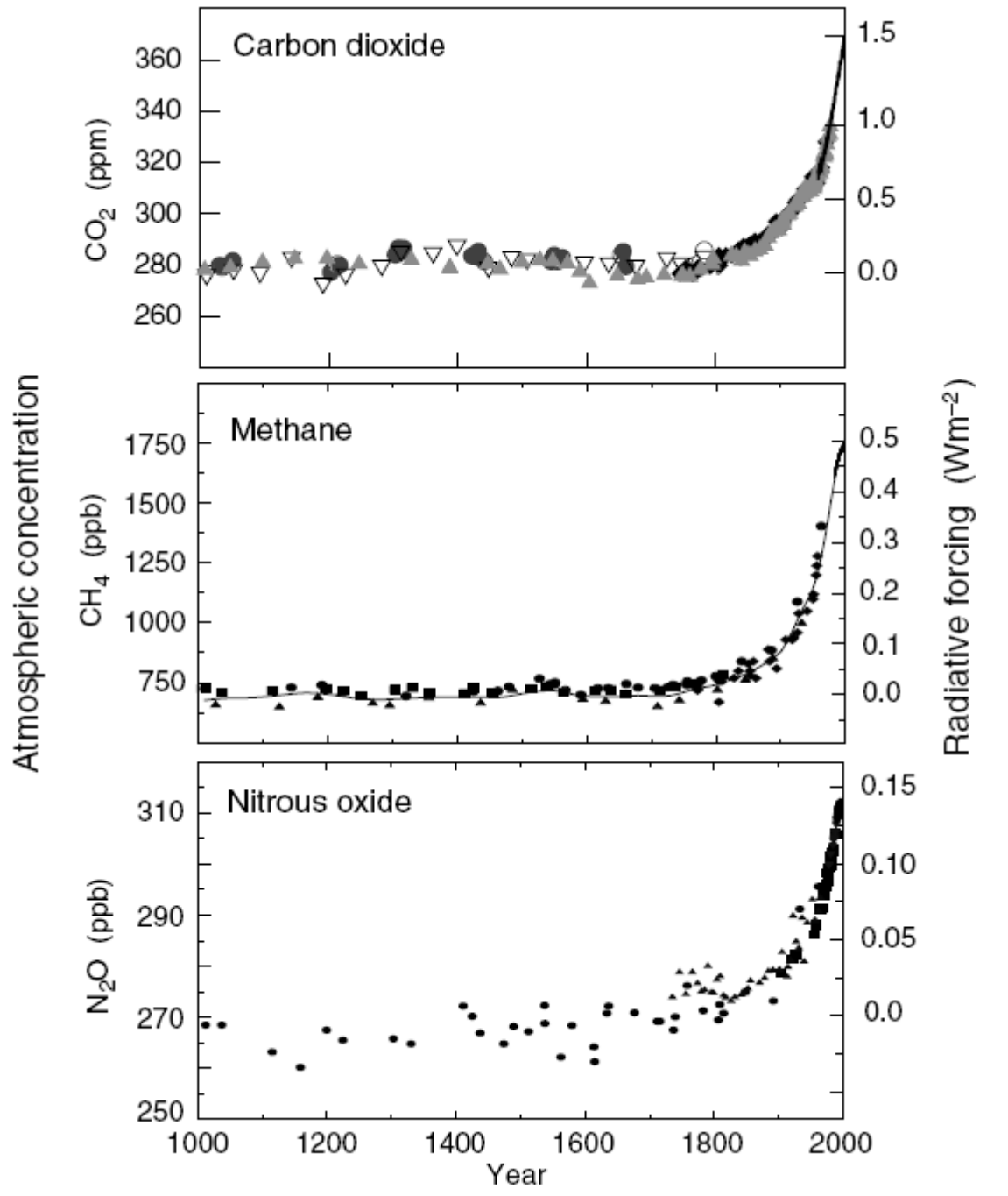


## Observations



Aktywność Słońca (a zatem i jasność) była w XX wieku największa od kilku stuleci. Czy jest to przyczyna globalnego ocieplenia? Na rysunkach ilość plam słonecznych od 1600 r. oraz mierzona satelitarnie jasność Słońca od 1978

# Gazy cieplarniane: ostatnie 1000 lat

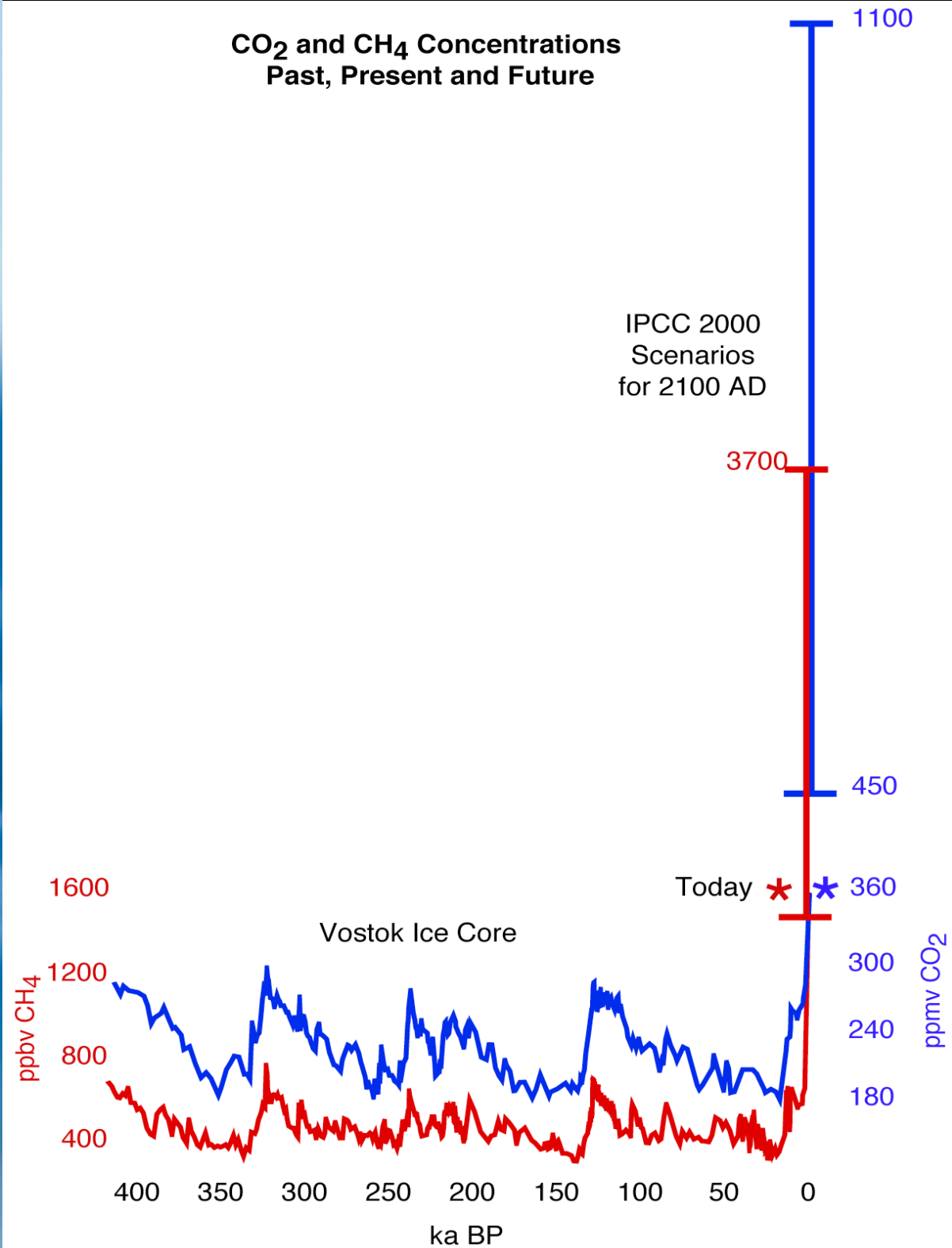


Od rozpoczęcia epoki przemysłowej, ok. 1800 ludzkość produkuje coraz większe ilości gazów cieplarnianych.

# Gazy cieplarniane

Jasność Słońca nie zwiększa się od 1950 roku a tymczasem gazy cieplarniane (szczególnie CO<sub>2</sub>) osiągnęły koncentracje nie widziane od setek tysięcy lat (a prawdopodobnie kilku milionów lat)

*Alverson, Bradley & Pederson 2002*

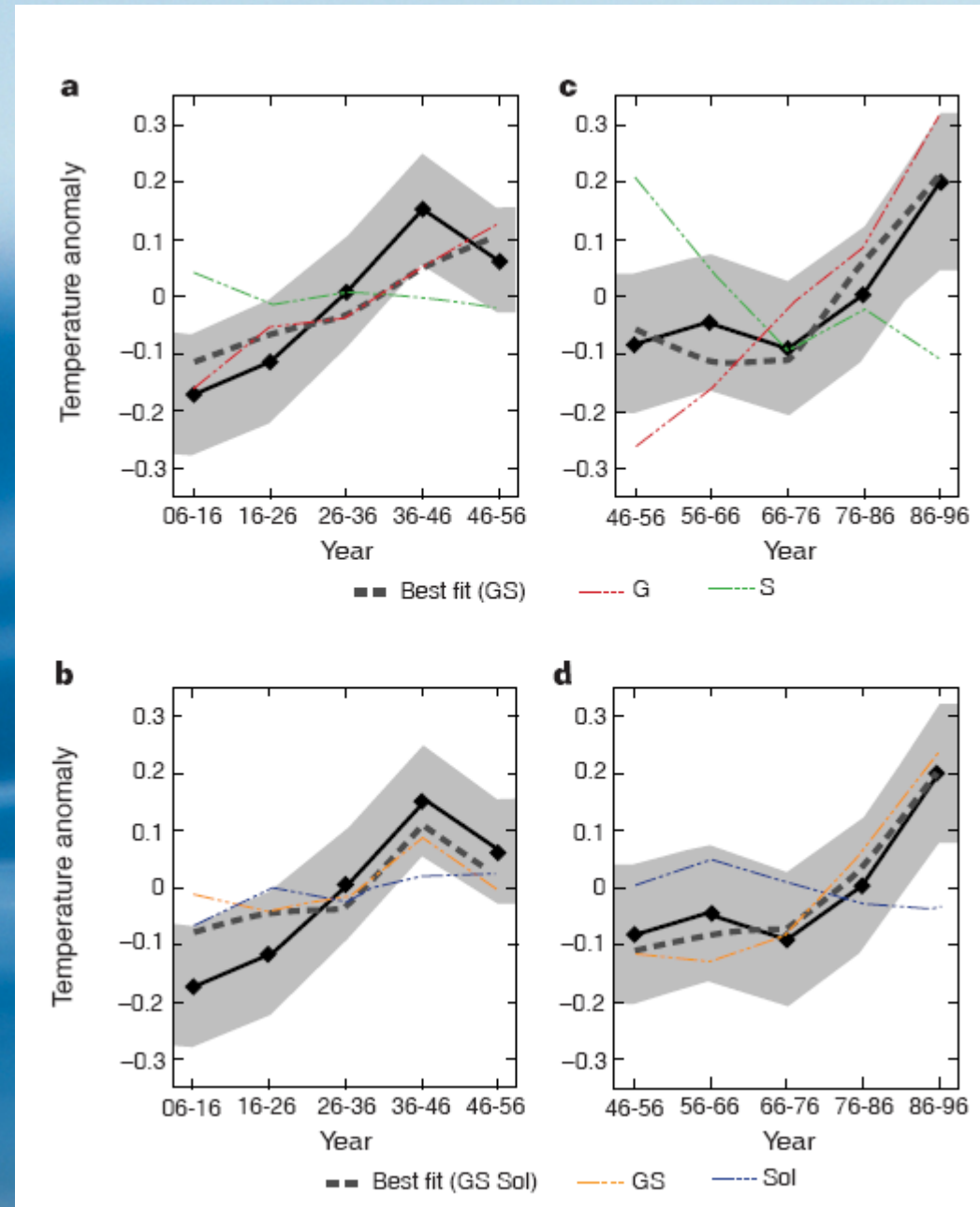


# Modelowanie zmian klimatu

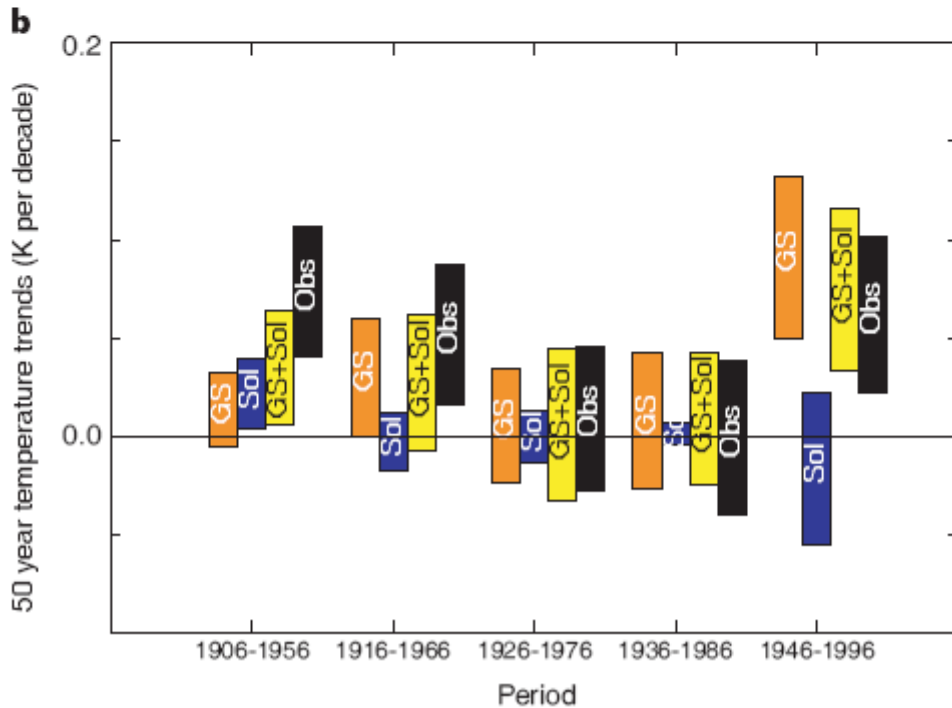
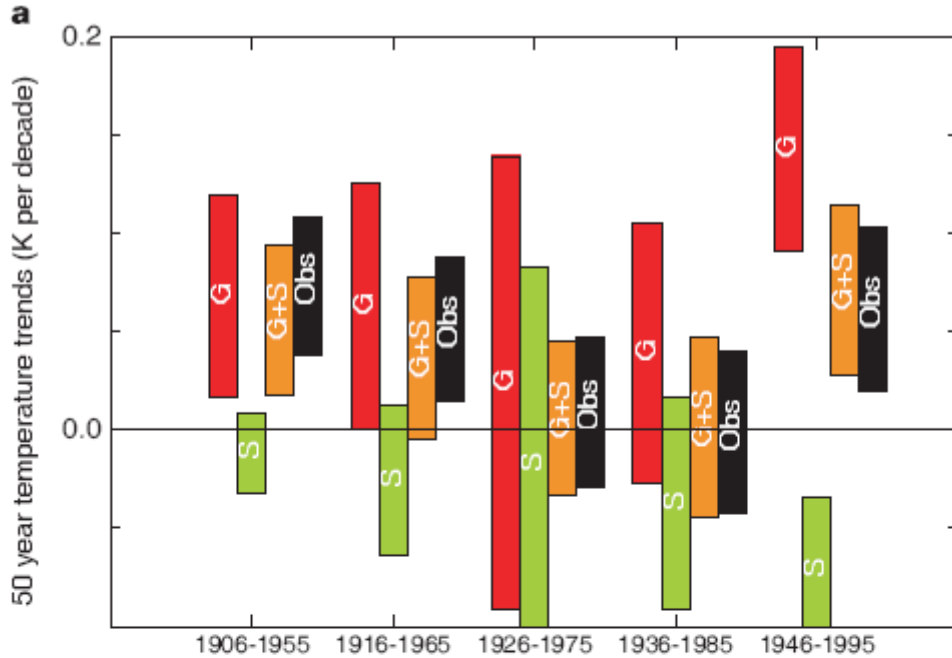
Dopasowanie modelowanego klimatu do obserwowanych zmian (czarna ciągła linia) dla pierwszej (lewe) i drugiej (prawe) połowy XX wieku. Szary pas oznacza zakres naturalnej zmienności międzyrocznej

Górne panele przedstawiają dopasowanie modelu HadCM2 wymuszanego wyłącznie zmiennością gazów cieplarnianych (G) i aerozolów siarkowych (S) oraz ich kombinacją (GS), dającą lepsze dopasowanie.

Dolny panel pokazuje wyniki modelowania z wymuszaniem GS, słonecznym (Sol) oraz ich kombinacją (GS Sol) dającą najlepsze dopasowanie.



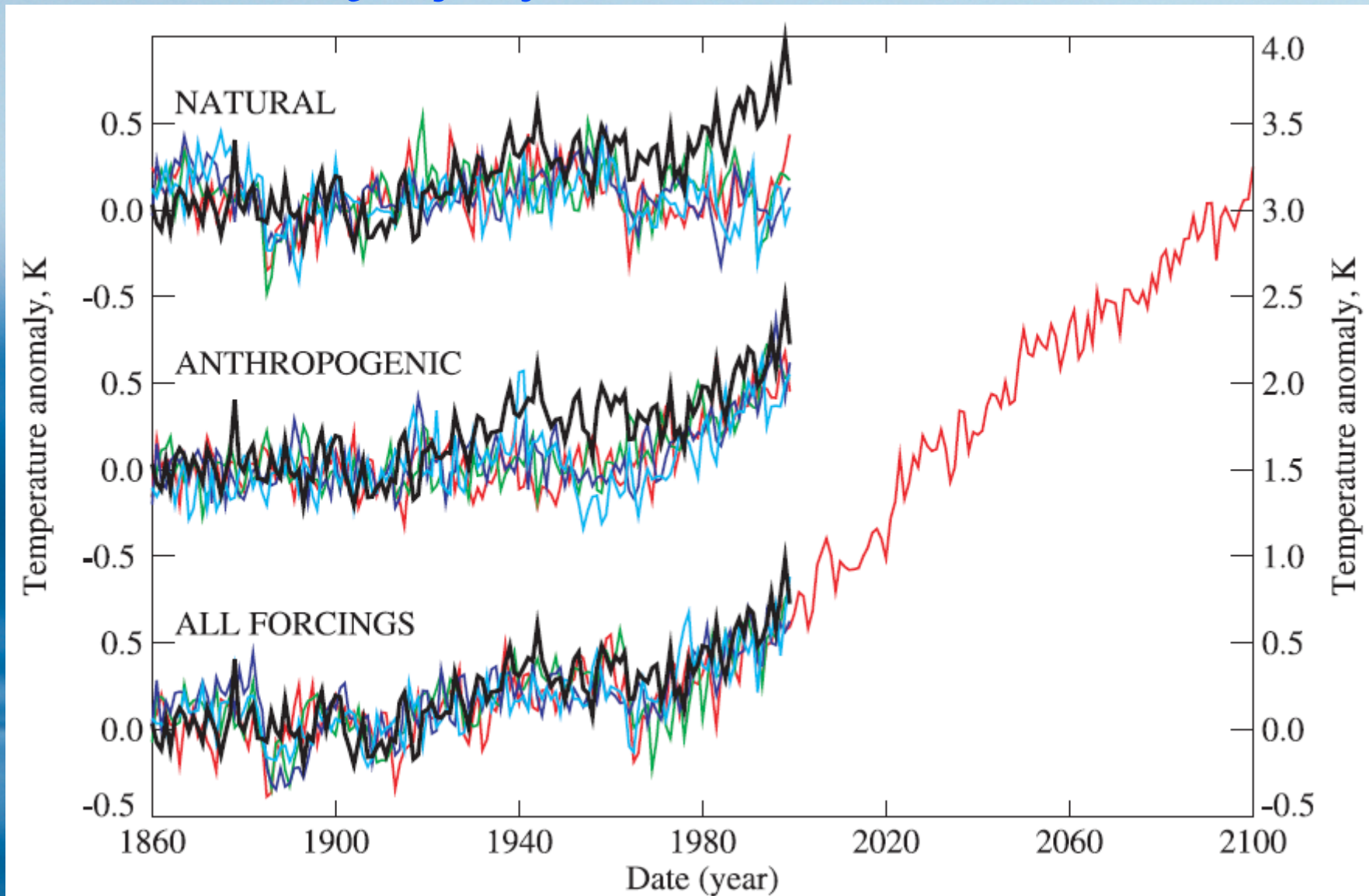
# To samo, ale nieco inaczej



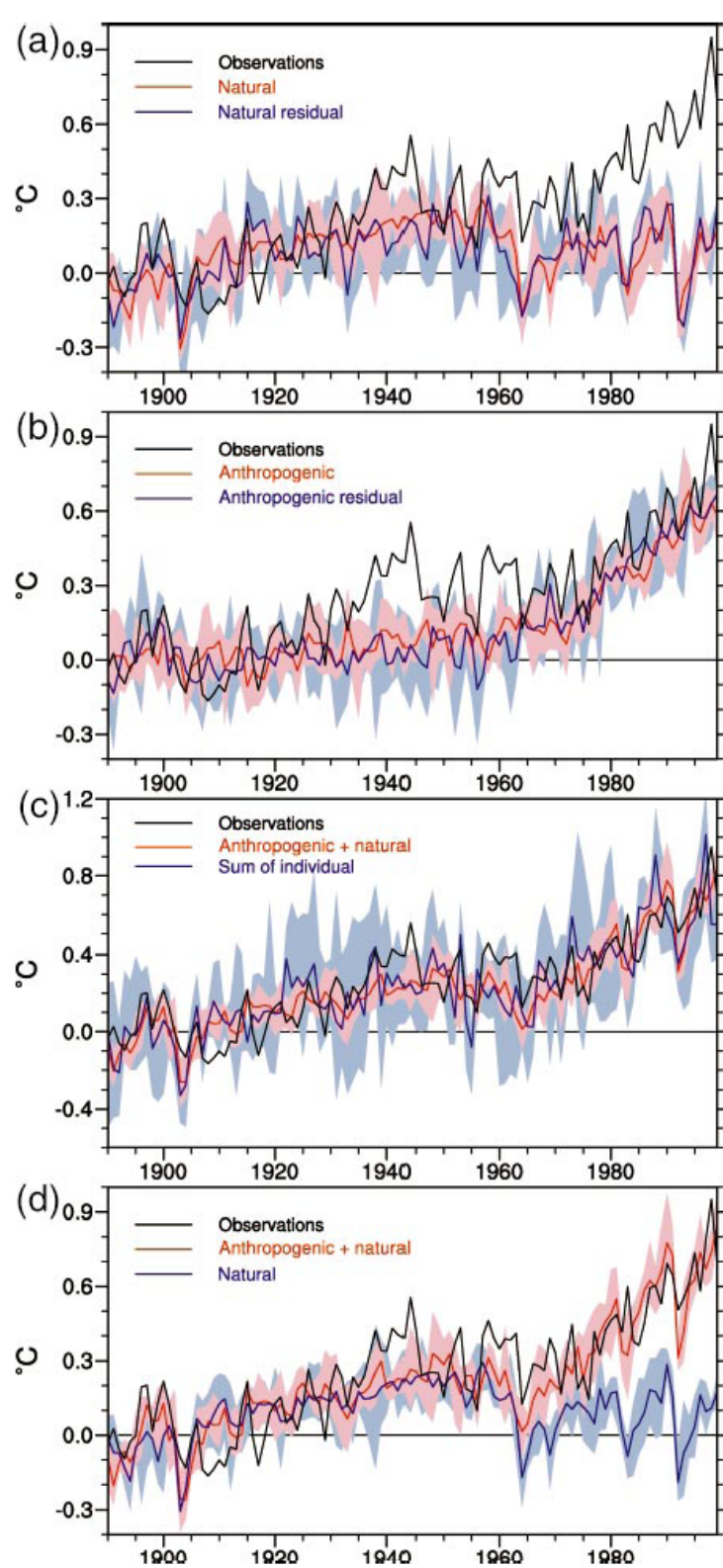
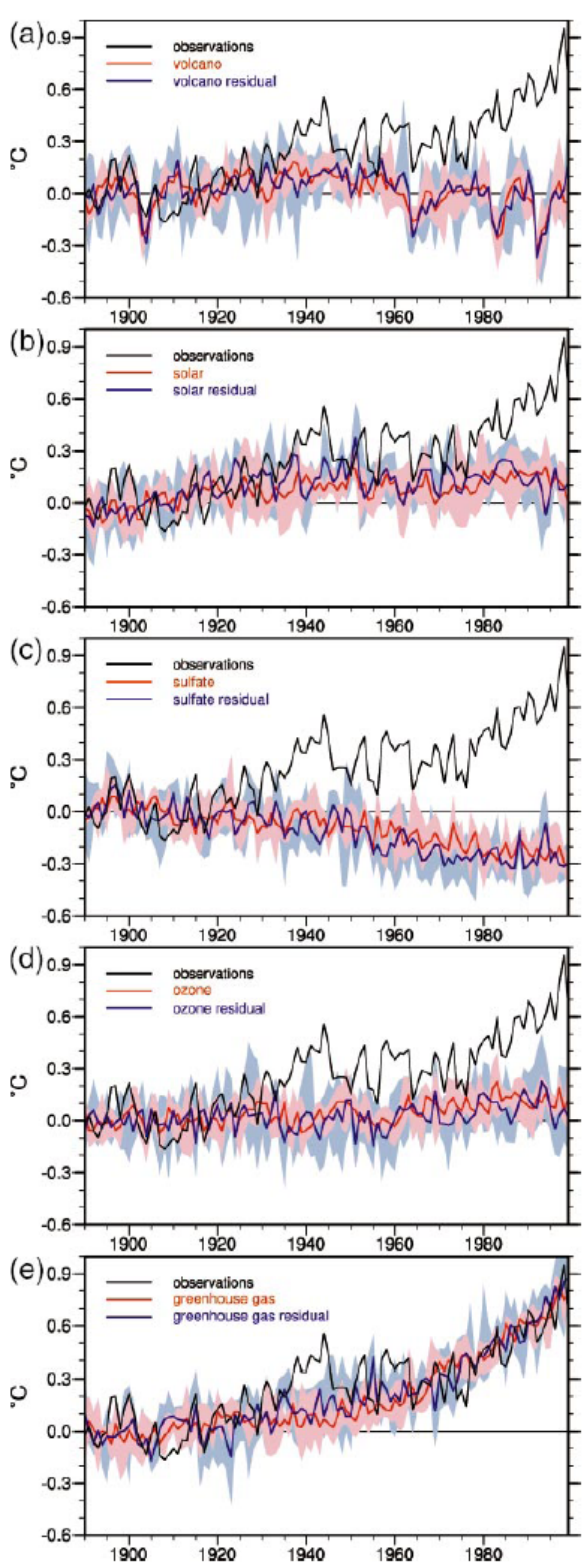
Porównanie modelowanych wymuszeń (G – gazy cieplarniane, S – aerozol siarkowy, Sol – wymuszenie słoneczne) i ich kombinacji z obserwowanymi zmianami temperatury (Obs).

Widoczne jest, że najlepsze dopasowanie dają wszystkie wymuszenia łącznie (GS+Sol jak należałoby się spodziewać). Trochę gorsze dopasowanie daje kombinacja gazów cieplarnianych i aerozolu (GS).

# Więcej wyników modelowania

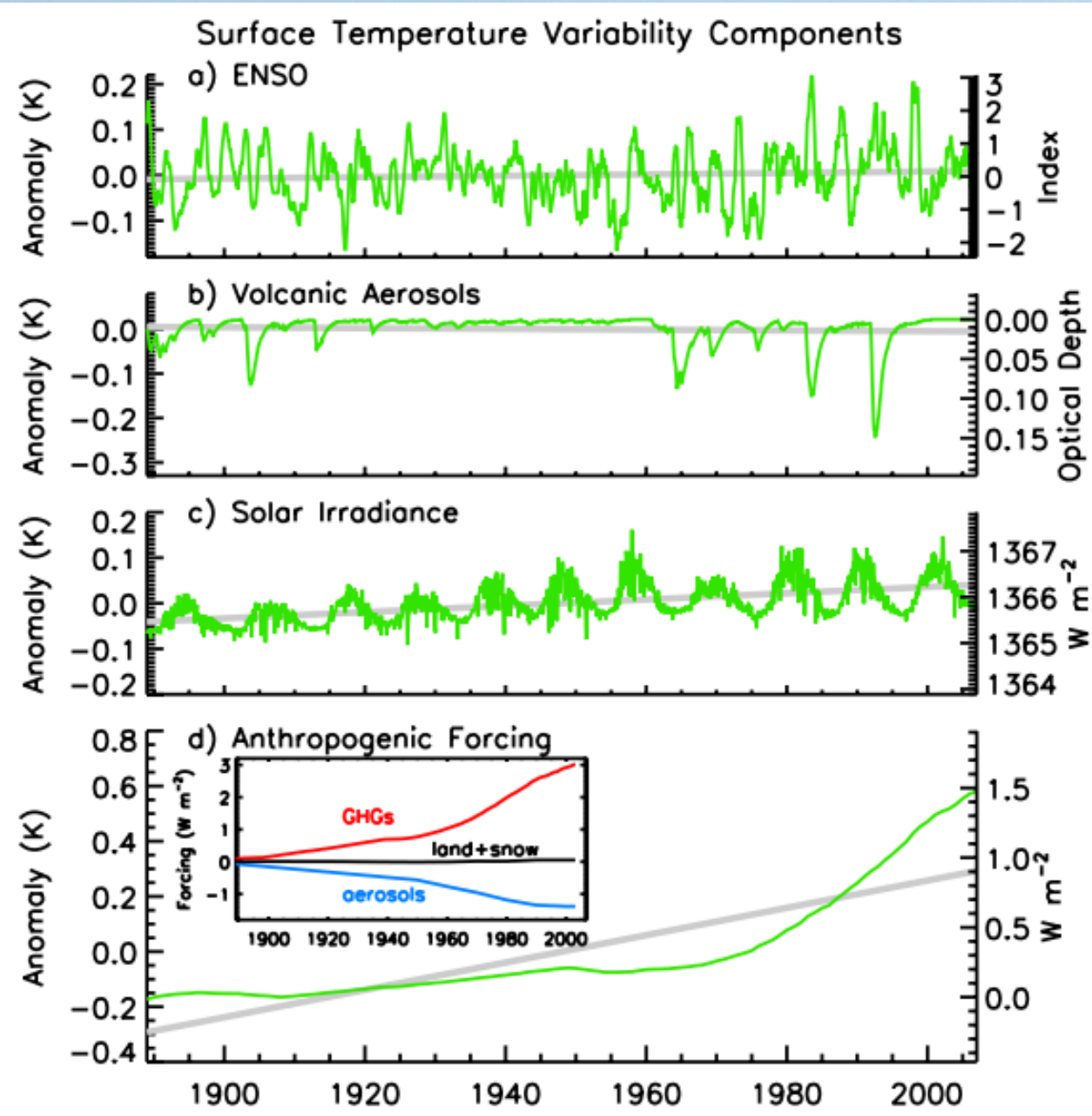


Wymuszenia naturalne (słońce i wulkanizm) nie potrafią wytłumaczyć obserwowanych zmian temperatury (czarne) podczas modelowania (model HadCM3). Wymuszenia antropogeniczne (gazy cieplarniane i aerozol) mają lepsze dopasowanie a oba efekty łącznie jeszcze lepsze.



Podobne wyniki późniejszego modelowania Meehla i innych modelem HadCM3 stanowią do dziś najlepszą bazę danych poszczególnych wymuszeń (kolejno po lewej: wulkanicznych, słonecznych, aerozoli siarkowych i gazów cieplarnianych) oraz ich kombinacji (kolejno po prawej: wymuszanie naturalne antropogeniczne, oba łącznie oraz porównanie **łącznego i naturalnego**).

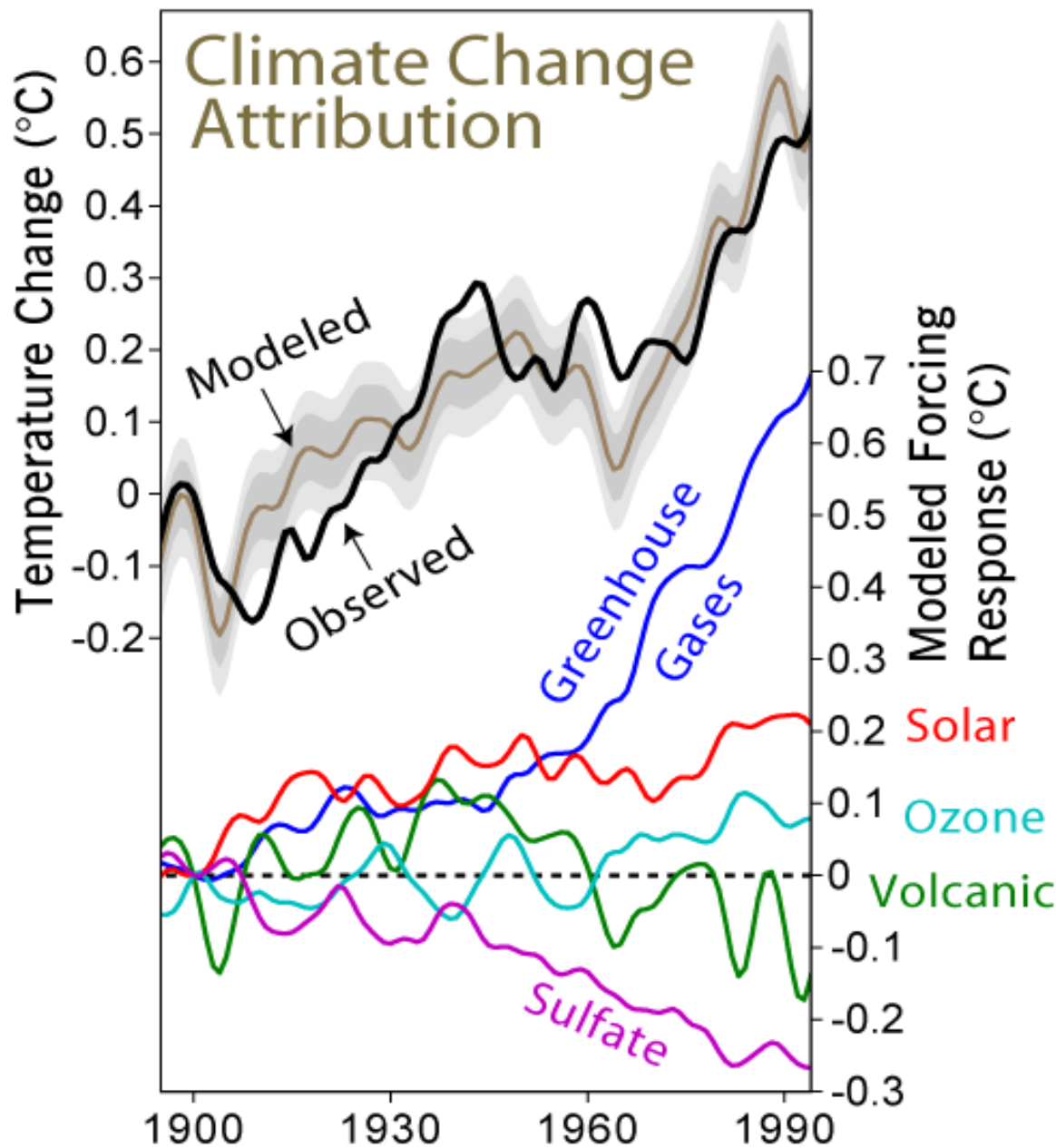
# Rozdział zmian temperatury na wymuszenia



Analiza metodą regresji liniowej wielu zmiennych pozwala rozdzielić XX wieczne zmiany temperatury (lewa oś) na znane wymuszenia (prawa oś): ENSO, wybuchy wulkanów, zmiany oświetlenia słonecznego oraz wymuszenia antropogeniczne (gazy cieplarniane i aerozol)

Widać, że od lat 1970-ch gazy cieplarniane stają się dominującą przyczyną zmian.

# Czyli jednak gazy cieplarniane

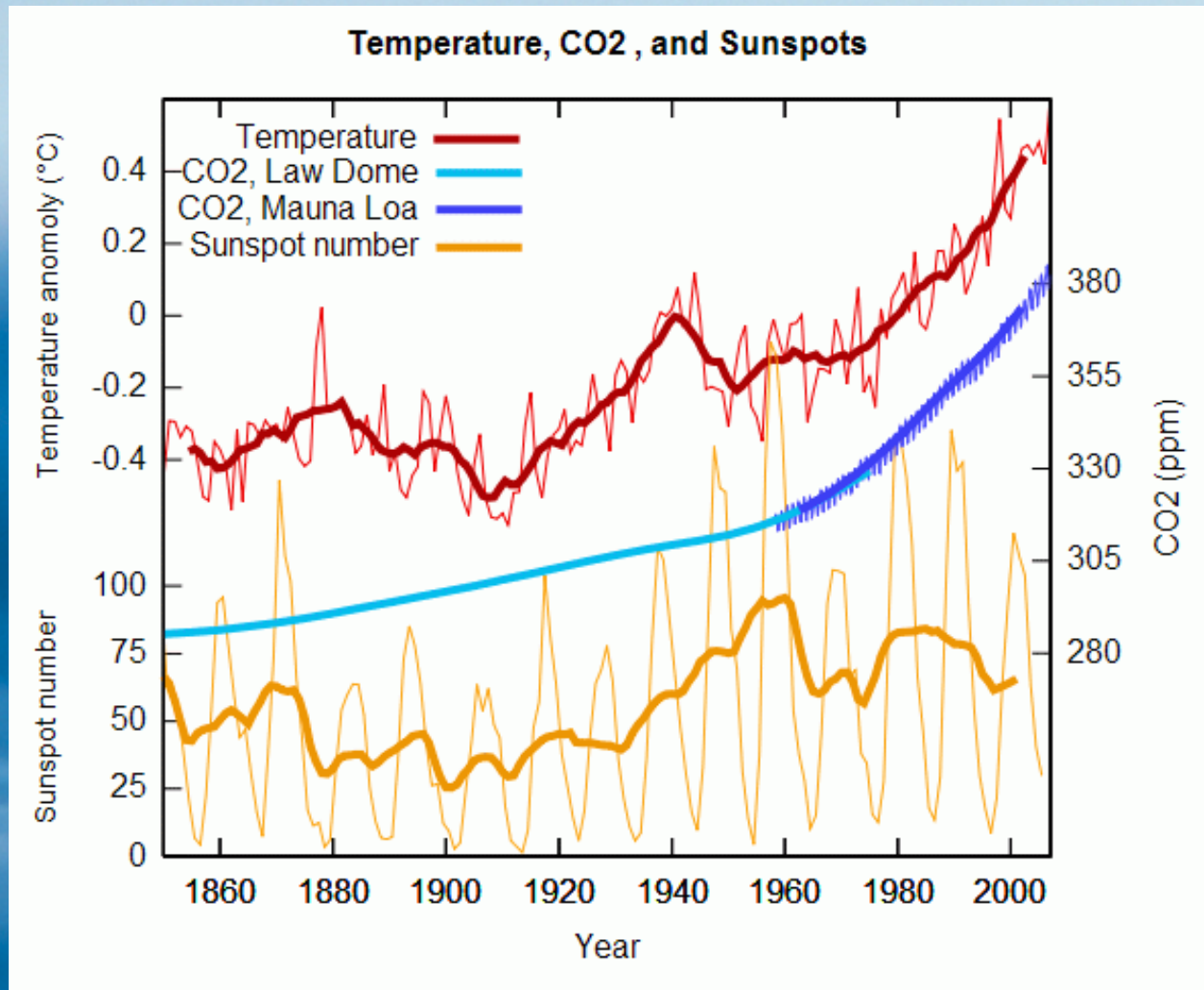


Za ocieplenie lat 1920-ch oraz 1930-ch po części „odpowiada” Słońce, brak wulkanów i gazy cieplarniane.

Za ochłodzenie lat 1950-ch i 1960-ch odpowiada głównie zwiększona emisja pyłów (aerozole siarkowe) oraz zwiększony wulkanizm.

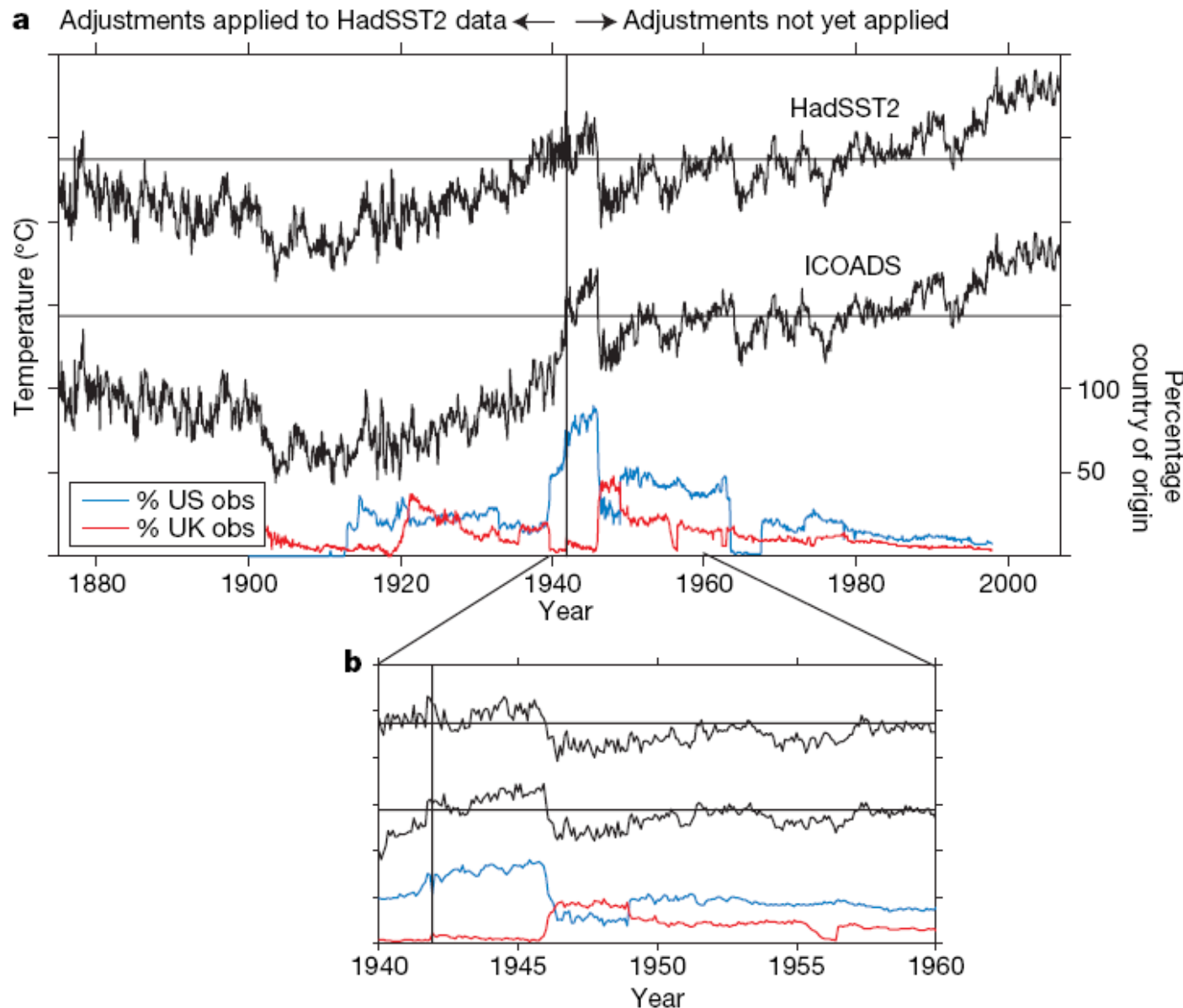
Ostatnich 30 lat szybkiego ocieplania nie da się wyjaśnić bez odwoływania się do gazów cieplarnianych, których wymuszenie dominowało w tym czasie .

# Temperatura, CO<sub>2</sub> i aktywność słońca



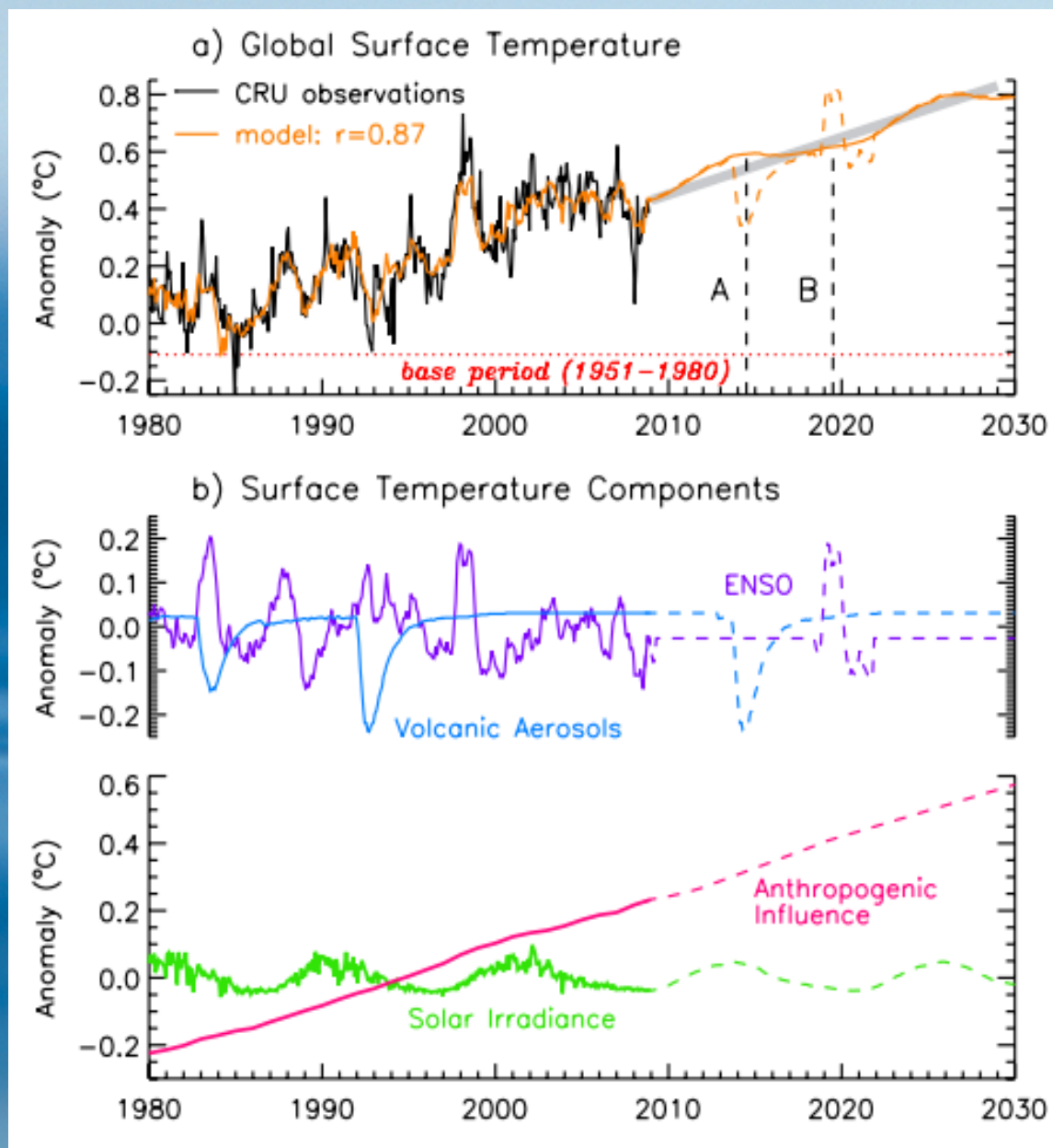
Proste zestawienie średniej temperatury Ziemi, koncentracji CO<sub>2</sub> (z rdzeni lodowych i od 1958 z Mauna Loa) oraz liczby plam słonecznych (miary aktywności Słońca) mówi chyba samo za siebie...

# Czy spadek temperatury w 1945 r. jest rzeczywisty?



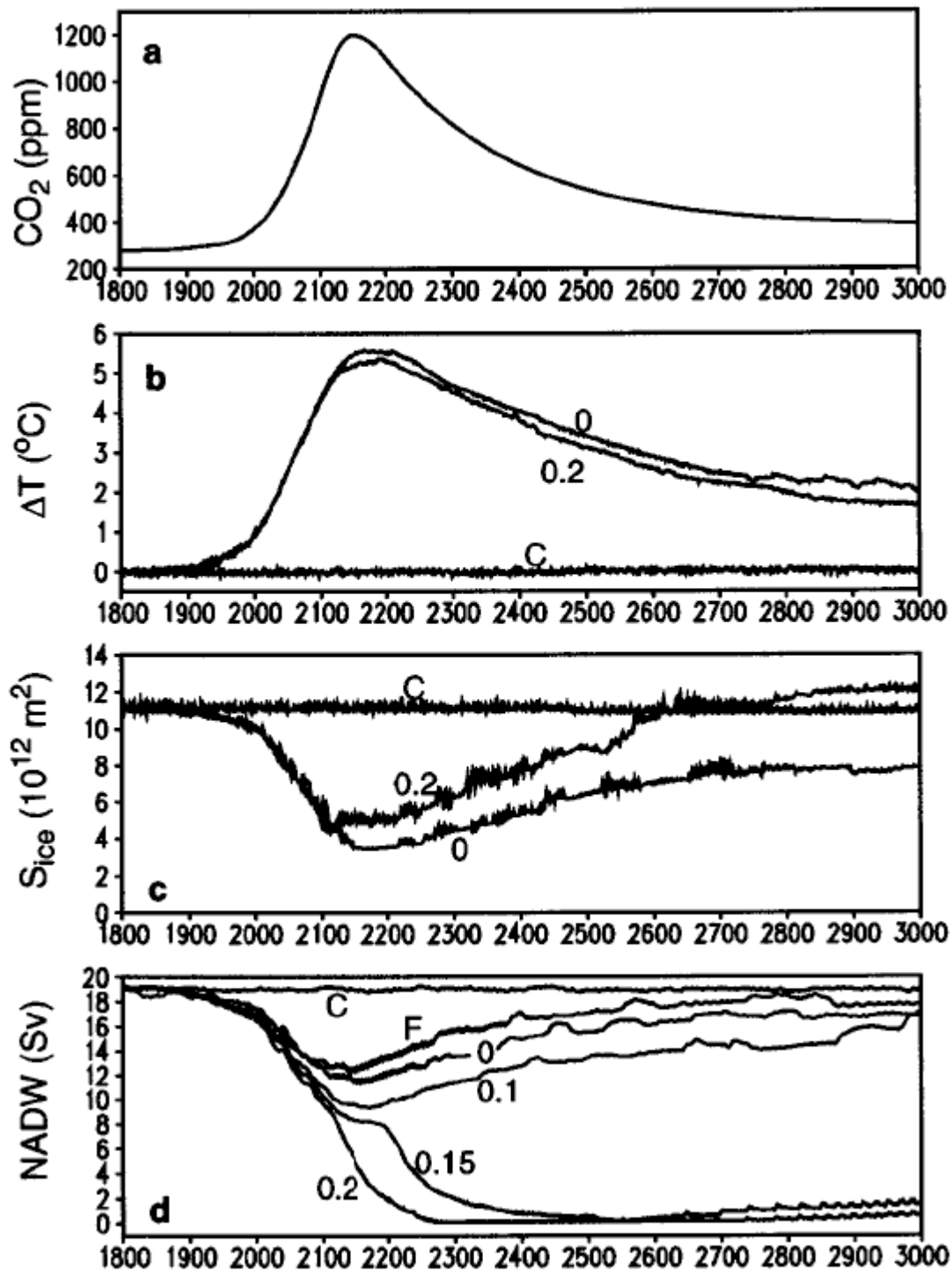
It seems that the mid-20<sup>th</sup> century SST discontinuity (not visible in land data), a 0.3° C drop in 6 months from August 1945, was an artifact caused by the British not measuring SST during the war. The British open bucket method was biased down while the US engine room intake method biased up.

# Wymuszenia antropogeniczne i naturalne następnych 20 lat



Prosta ekstrapolacja antropogenicznego wymuszenia radiacyjnego oraz dodanie dla ilustracji jednego wybuchu wulkanu (A) i jednego silnego El Nino (B) pokazuje, że w skali 20 następných lat wymuszenia antropogeniczne powinny całkowicie zdominować możliwą zmienność naturalną.

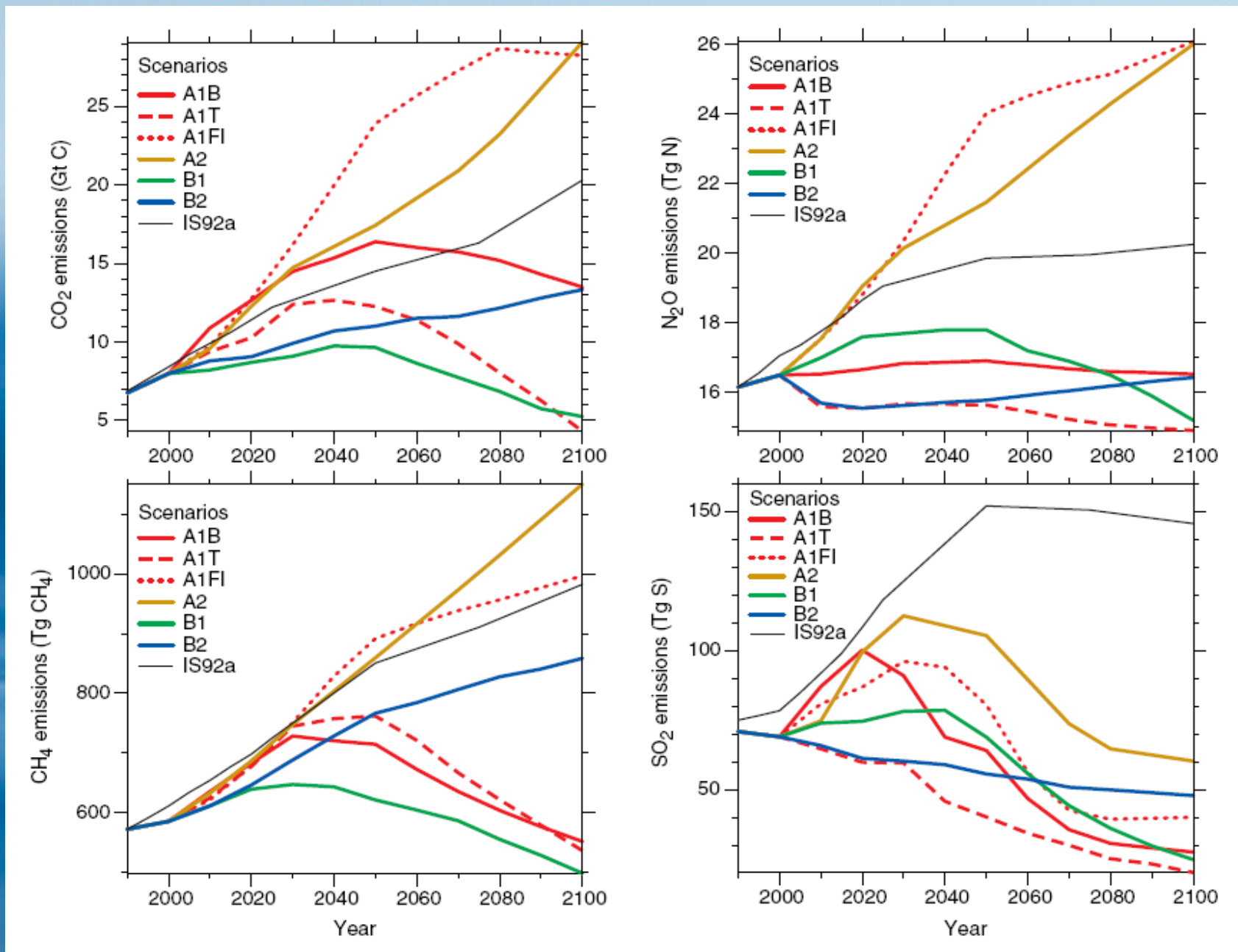
# CO<sub>2</sub> i THC



Modelowanie (CLIMBER-2) efektu przyszłych zwiększonych koncentracji CO<sub>2</sub> (a), spowodowanych tym zmian temperatury (b), pokrycia mórz arktycznych lodem (c) i wielkości cyrkulacji termohalinowej (d). Liczby oznaczają wywołany zmianami klimatycznymi dopływ słodkiej wody (w Sv) do Północnego Atlantyku – parametr swobodny modelu.



# Scenariusze emisji używane przez IPCC...



Emisja gazów cieplarnianych w scenariuszach IPCC z 2001 roku.

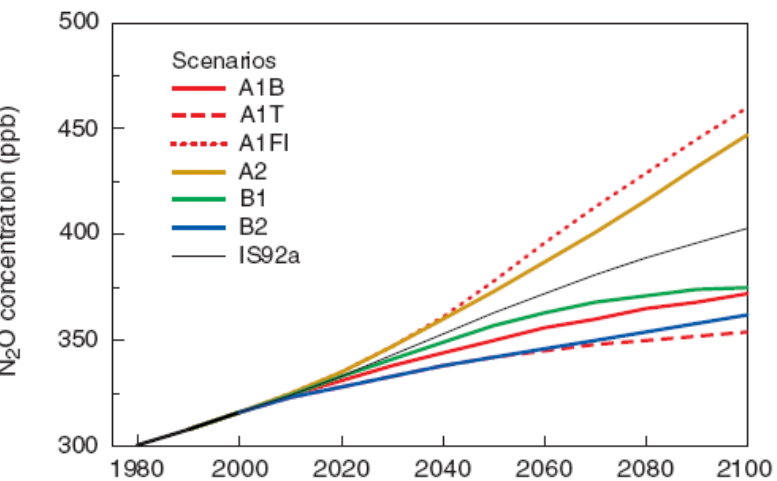
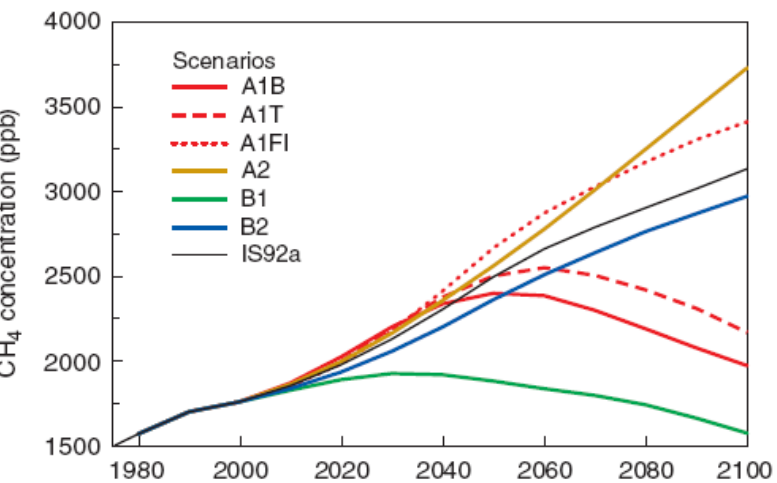
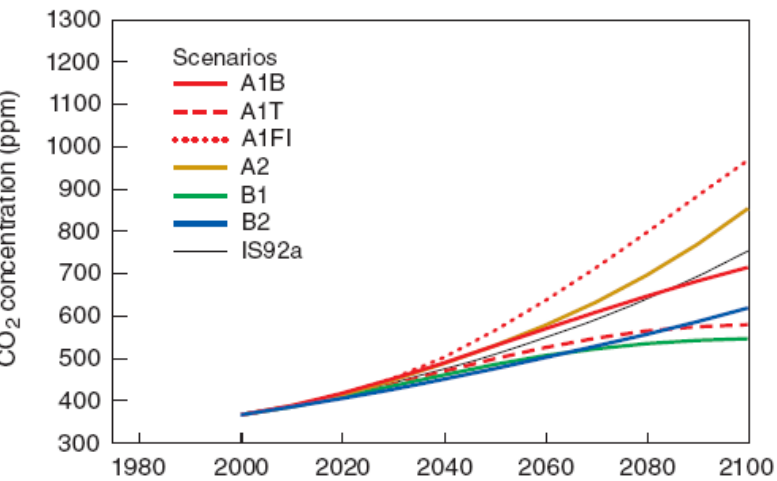
## ...spowodowane tym zmiany koncentracji...

A1 to świat szybkiego wzrostu gospodarczego i globalizacji z wariantami: A1F to świat gospodarki opartej na paliwach kopalnych, A1T nie-kopalnych a A1B to świat pośredni.

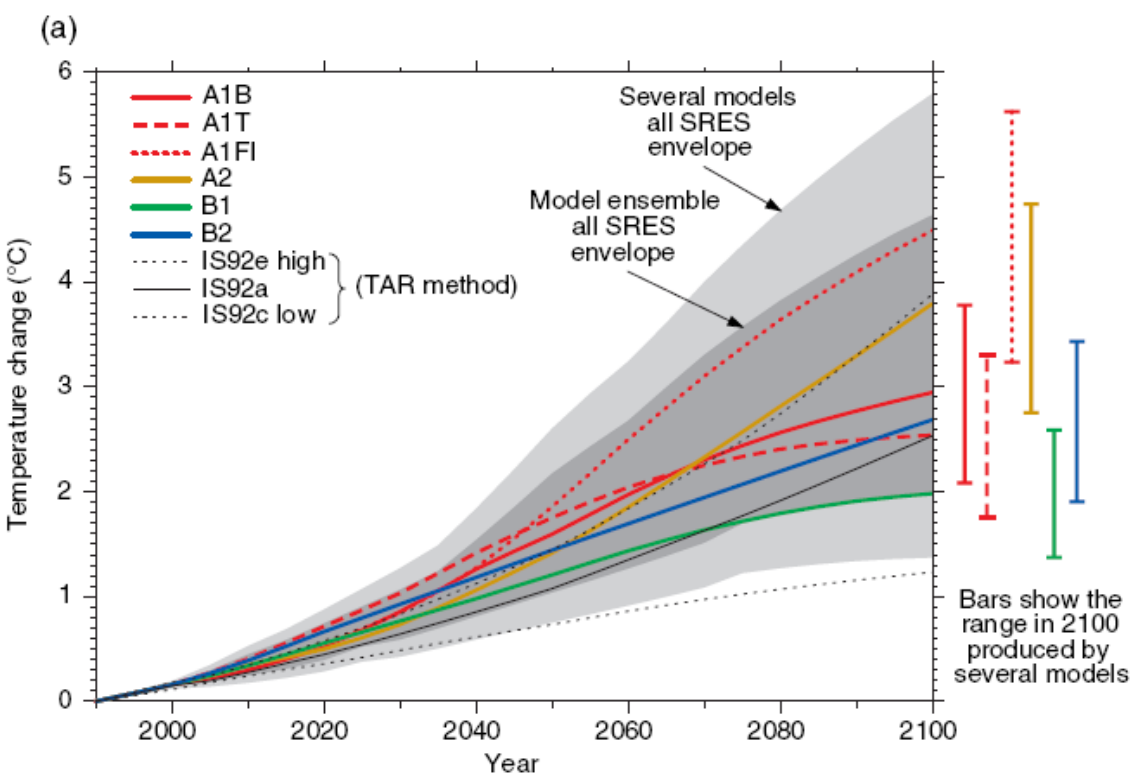
A2 to świat o bardziej zróżnicowanym wzroście gospodarczym ale (przez to) większym przyroście ludności bez specjalnych starań o ochronę przyrody.

B1 to świat podobny do A1 ale z szybszym przechodzeniem gospodarki światowej do fazy postindustrialnej (usługi i informatyzacja)

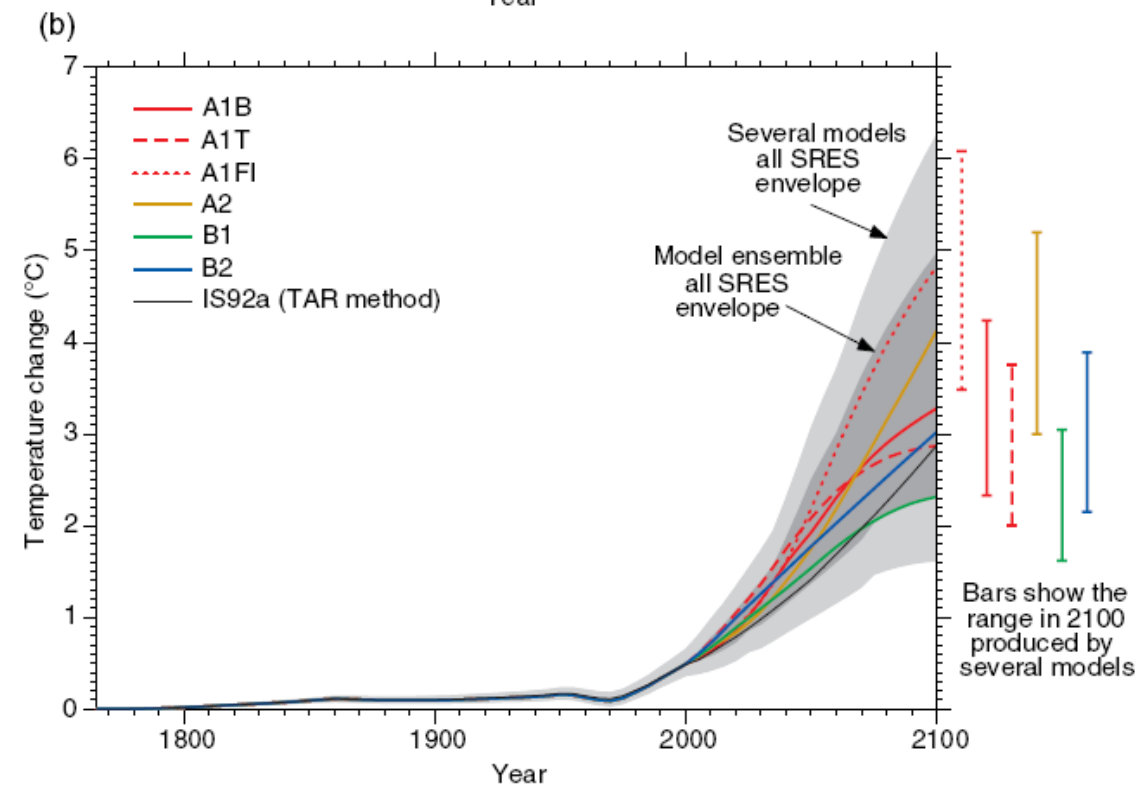
B2 to świat bez globalizacji, wolniej rozwijając się niż A1 i B1 ale bardziej zorientowany na ekologię i równość społeczną.



...zaowocują podwyższeniem temperatury planety.

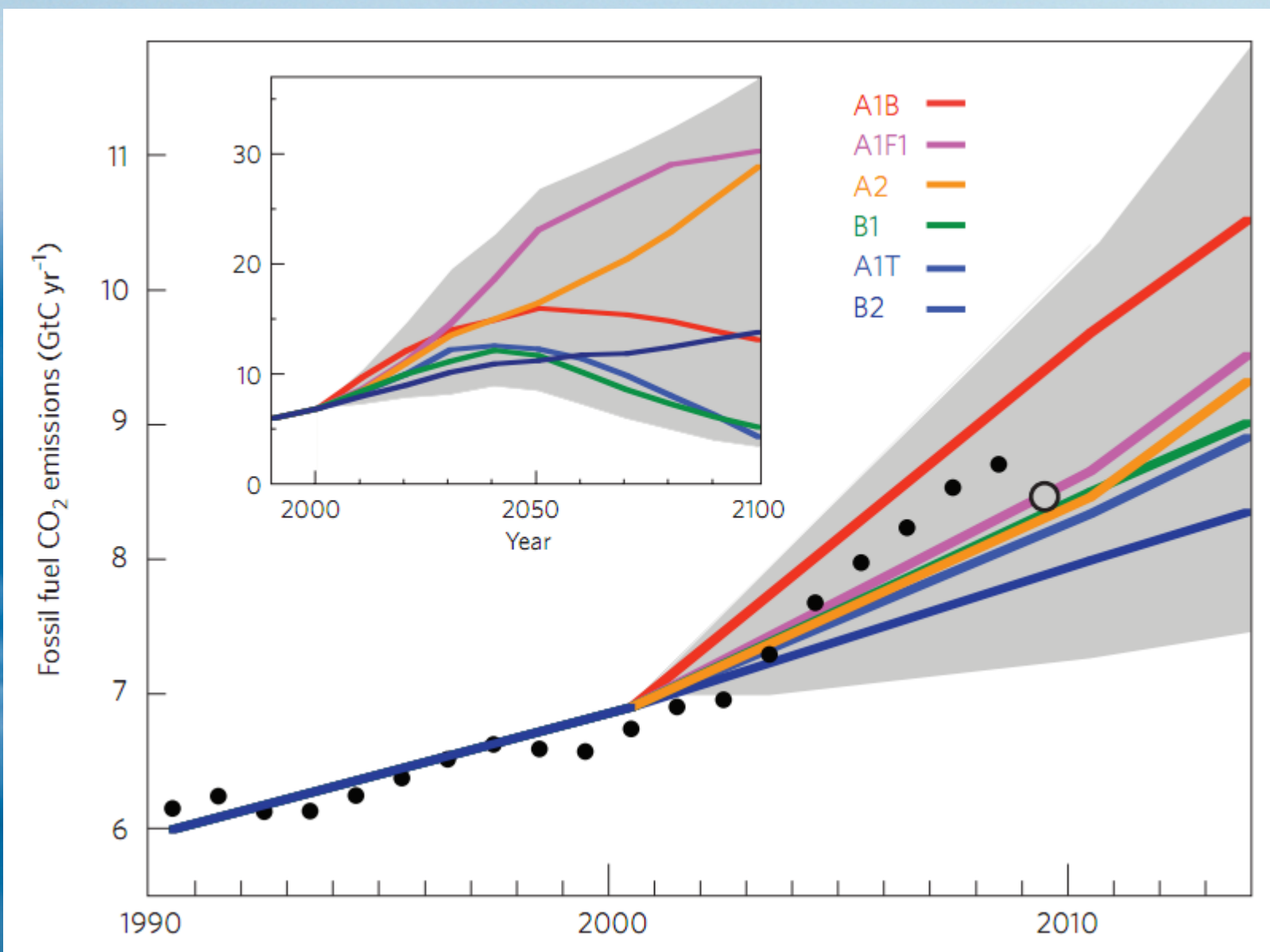


a) Średnie wartości wyliczonych anomalii temperatury do roku 2100 (oraz zakresu zmienności) dla szeregu użytych modeli klimatycznych dla sześciu scenariuszy IPCC 2001 (oraz dla porównania trzech scenariuszy z wcześniejszego raportu)



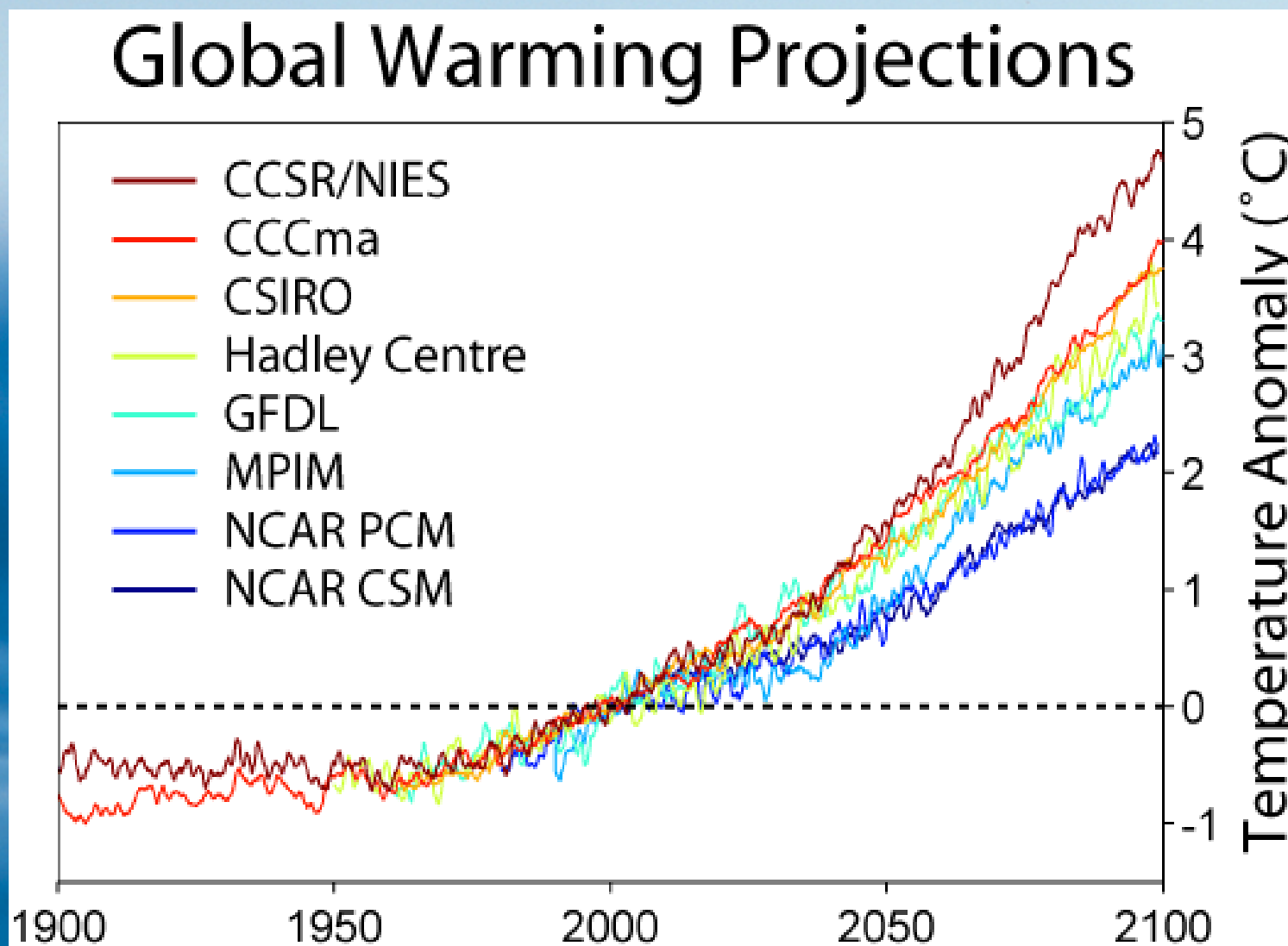
b) te same dane ale pokazane w kontekście temperatur historycznych od początku epoki przemysłowej (uwaga: skala temperatur przesunięta o około pół stopni do wartości z roku 1800)

# Problem w tym, że już emitujemy więcej niż ICC przewidziało we wszystkich scenariuszach oprócz jednego



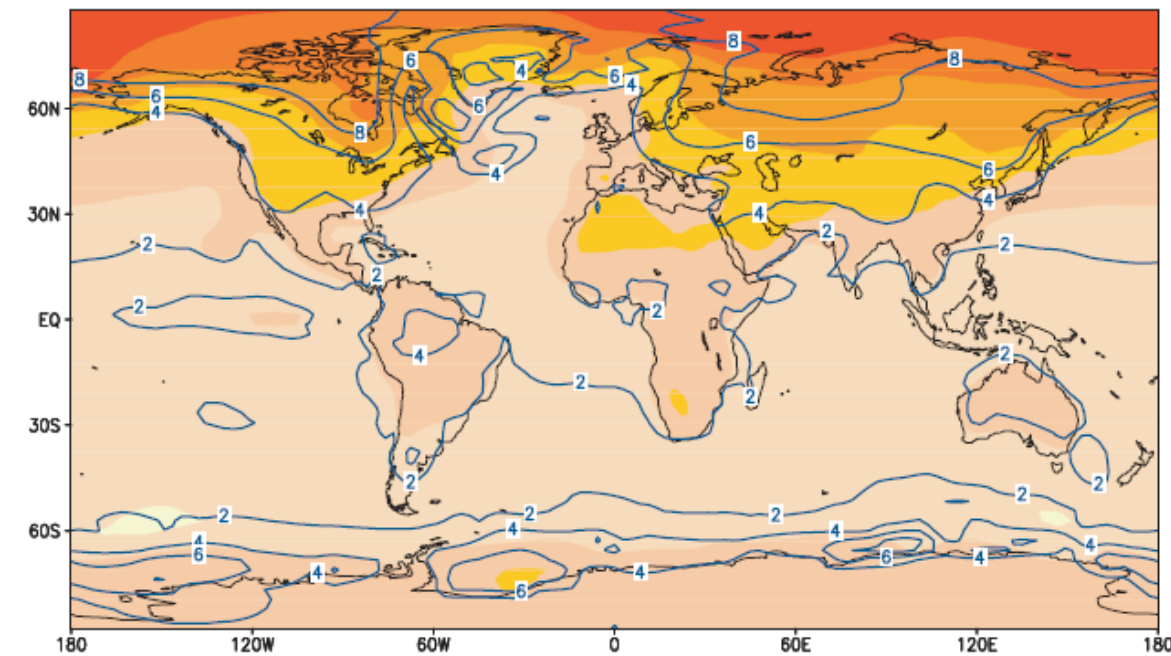
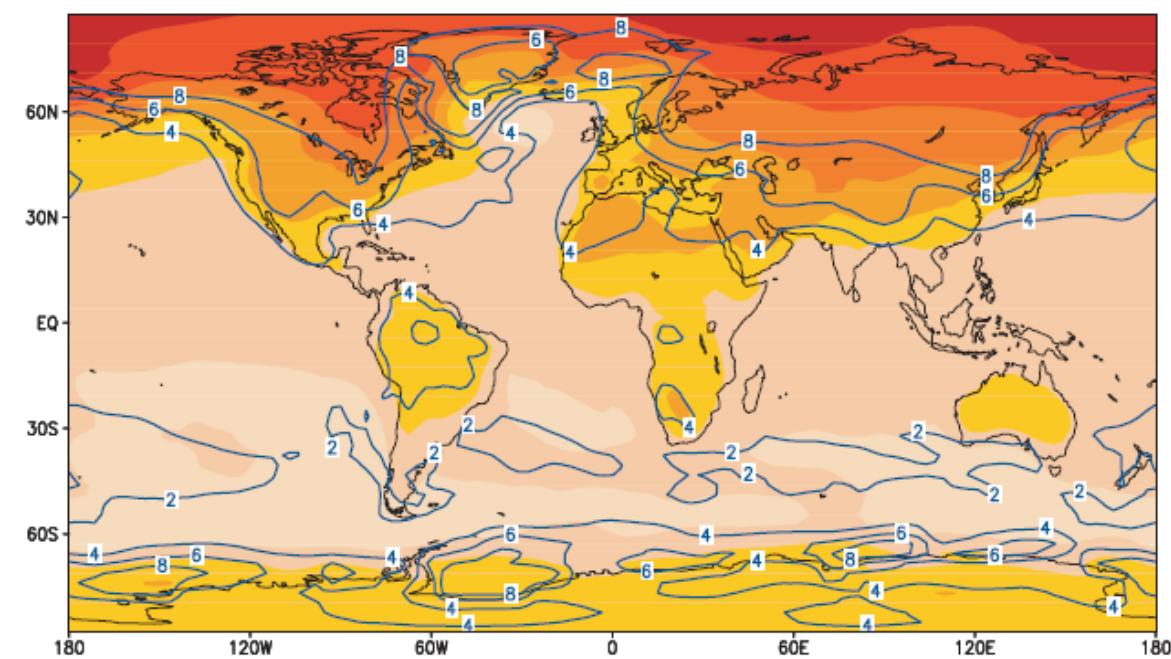
Co prawda kryzys w 2009 roku (otwarte kółko) zbliżył nas do środka przedziału scenariuszy. Ale czy na długo?

# Zestaw modeli użytych przez IPCC



Wyniki ośmiu modeli klimatycznych dla scenariusza A2

# Świat końca XXI wieku

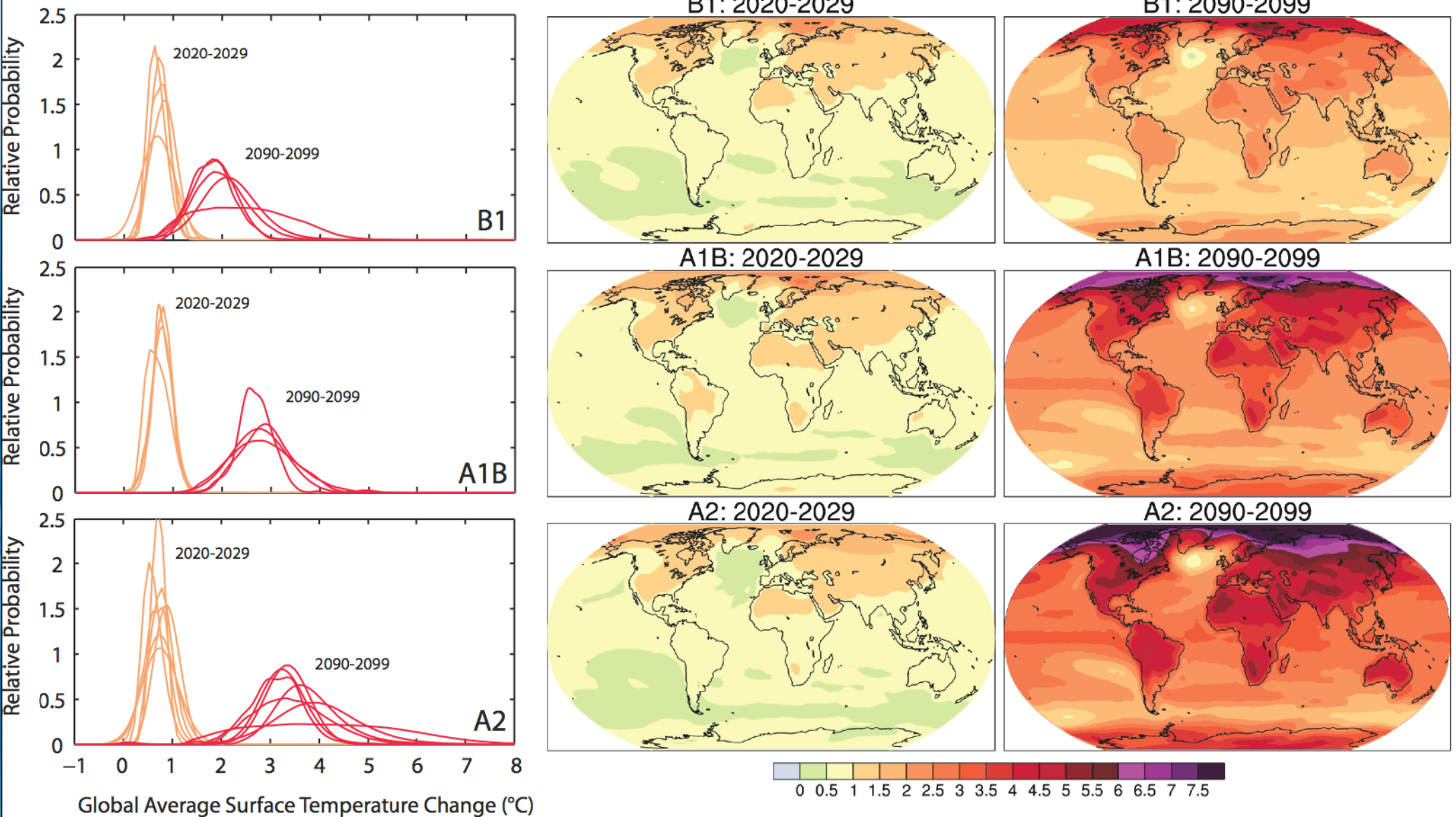


Przykładowe wyniki modelowania (średnia dla zestawu modeli). Rysunki przedstawiają średnią zmianę temperatury dla lat 2071-2100 w porównaniu do lat 1910-1990 dla scenariusza A2 i B2.

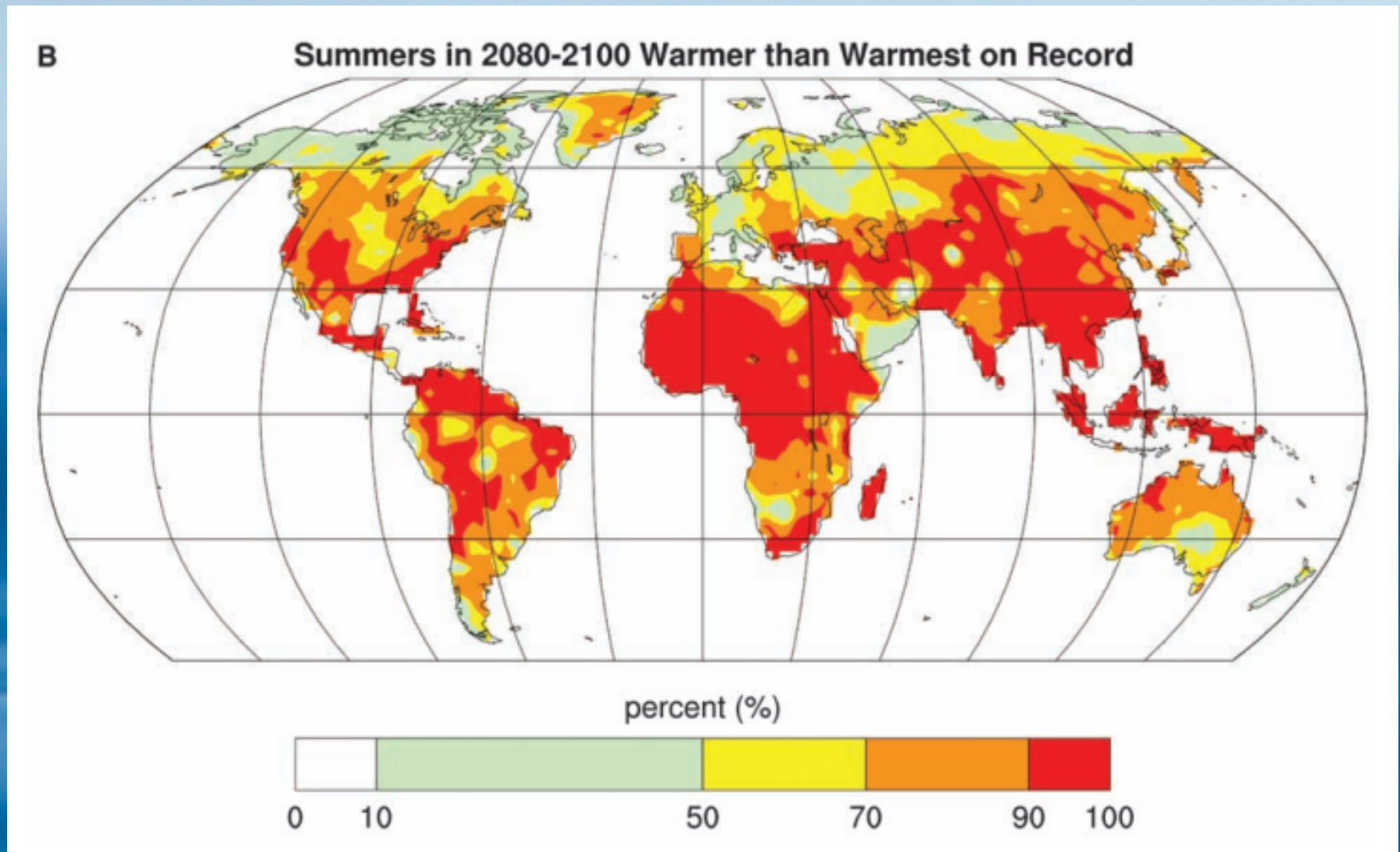
Zwraca uwagę szczególnie duży wzrost temperatury w Arktyce.

# Wyniki modelowania IPCC 2007

## AOGCM Projections of Surface Temperatures



# Więcej strasznych wyników modelowania

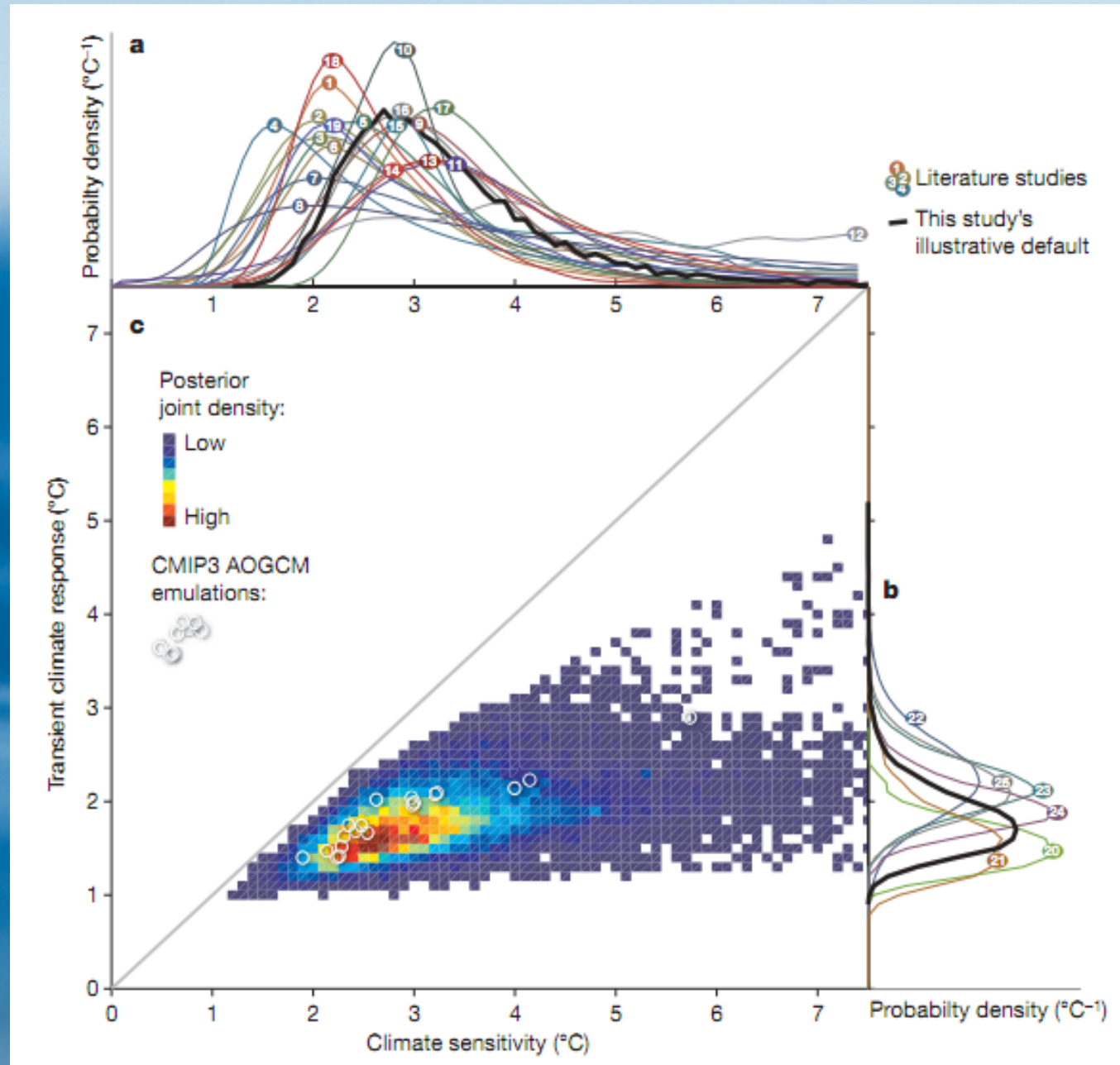


Procent okresów letnich w okresie 2080-2100 gorętszych niż obecnie najgorętsze lato. Zwraca uwagę mały procent takich fal gorąca dla Rosji, która już miała jedno takie lato rok po opublikowaniu artykułu.

# Jakie są szacunki czułość klimatu na CO<sub>2</sub>?

Wykres przedstawia oceany czułości klimatu na podwojenie CO<sub>2</sub> czyli o ile temperatura podniesie się docelowo po ogrzaniu oceanu (oś pozioma) oraz czułości przejściowej (oś pionowa) czyli o ile temperatura podniesie się w momencie podwojenia przy zwiększaniu koncentracji CO<sub>2</sub> o 1% rocznie.

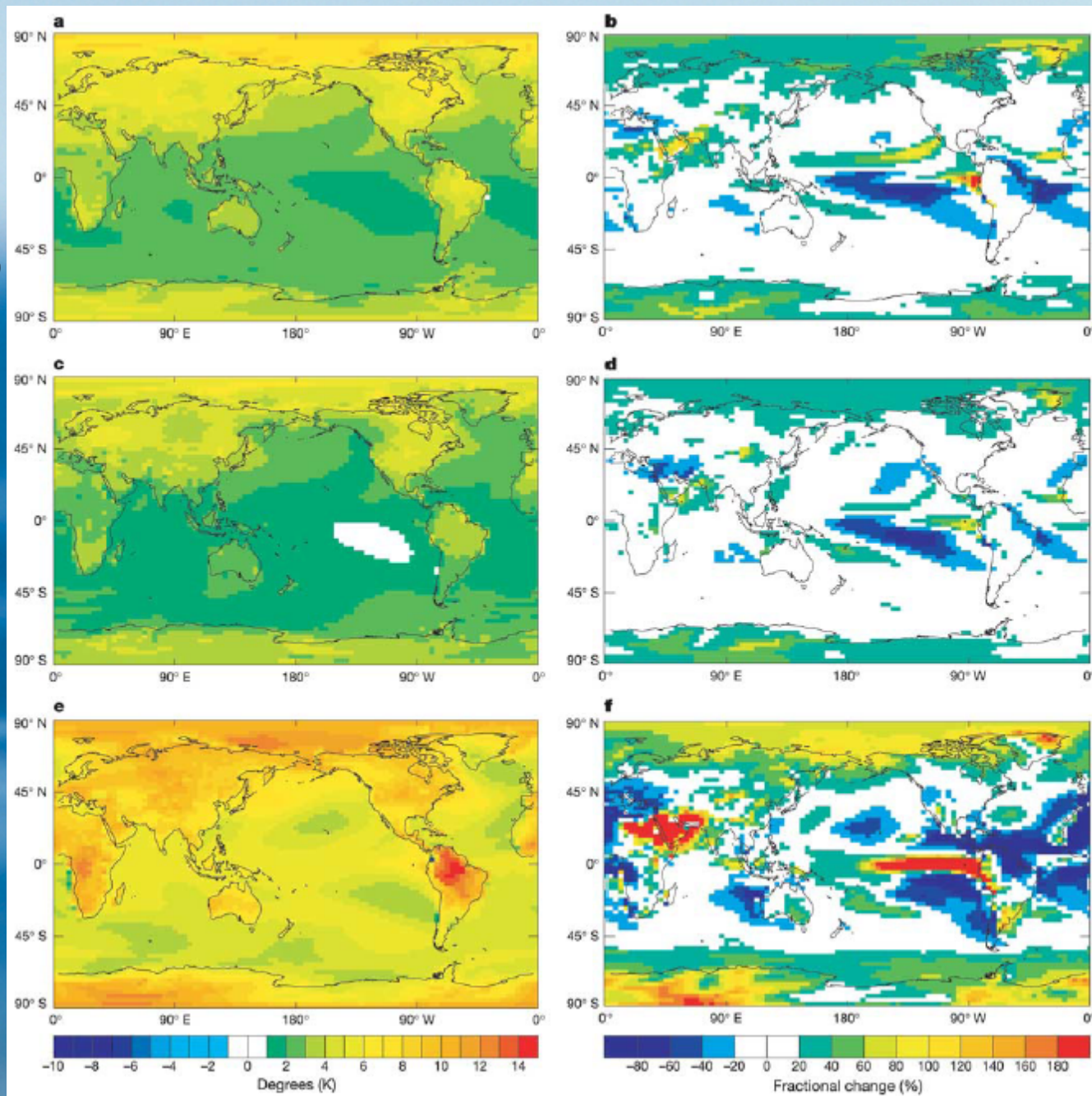
IPCC oceania czułość klimatu na 2.0 – 4.5 C



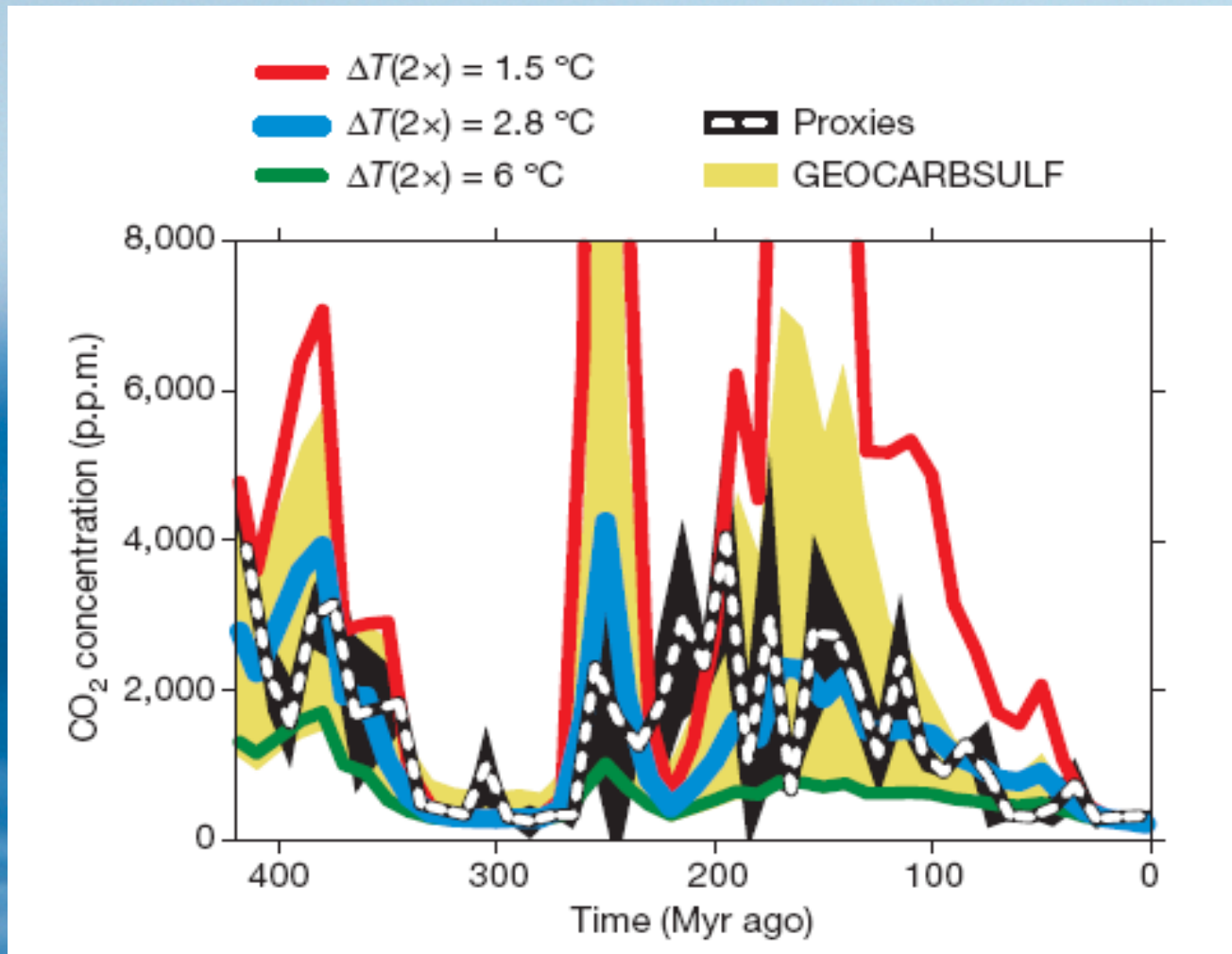
# A jeśli źle oceniamy czułość klimatu na CO<sub>2</sub>?

Program modelowania klimatu przy pomocy wolnej mocy PC ochotników climateprediction.net (analogiczny do Seti@Home) pozwolił na przeprowadzenie tysięcy przebiegów modelu z różnymi założeniami.

Jednym z testowanych parametrów jest wrażliwość klimatu na podwojenie CO<sub>2</sub>, obecnie szacowany na 1.5-4.5 °C z najbardziej prawdopodobną wartością ok. 3.0 °C. Rysunek przedstawia zmiany temperatury i opadów przy podwojeniu CO<sub>2</sub> dla wartości parametru (od góry): 3.4, 2.5 i 10.5 °C.



# Paleoklimat a czułość klimatu na podwojenie CO<sub>2</sub>



Rekonstrukcje koncentracji atmosferycznej CO<sub>2</sub> oraz temperatury w fanerozoiku pozwalają na niezależne oszacowanie czułości klimatu na podwojenie CO<sub>2</sub>. Autorzy ostrożnie szacują ją na 1.5 – 6.2 C°, jednak ich wykres niedopasowania (nie pokazany) ma minimum ok 3 °C.

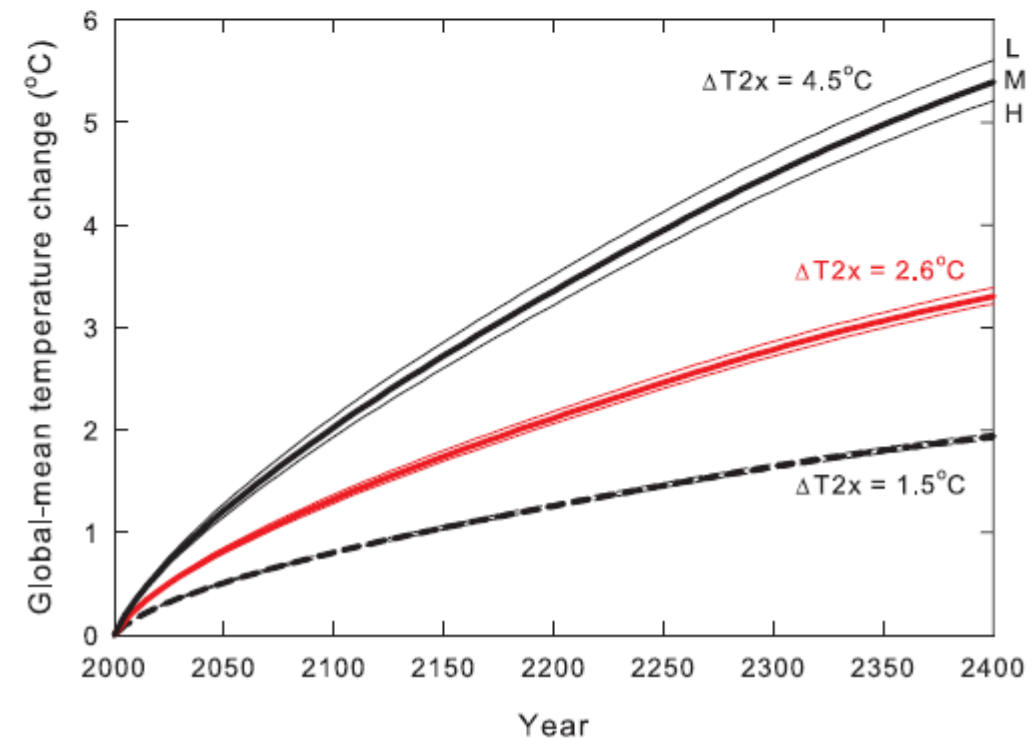
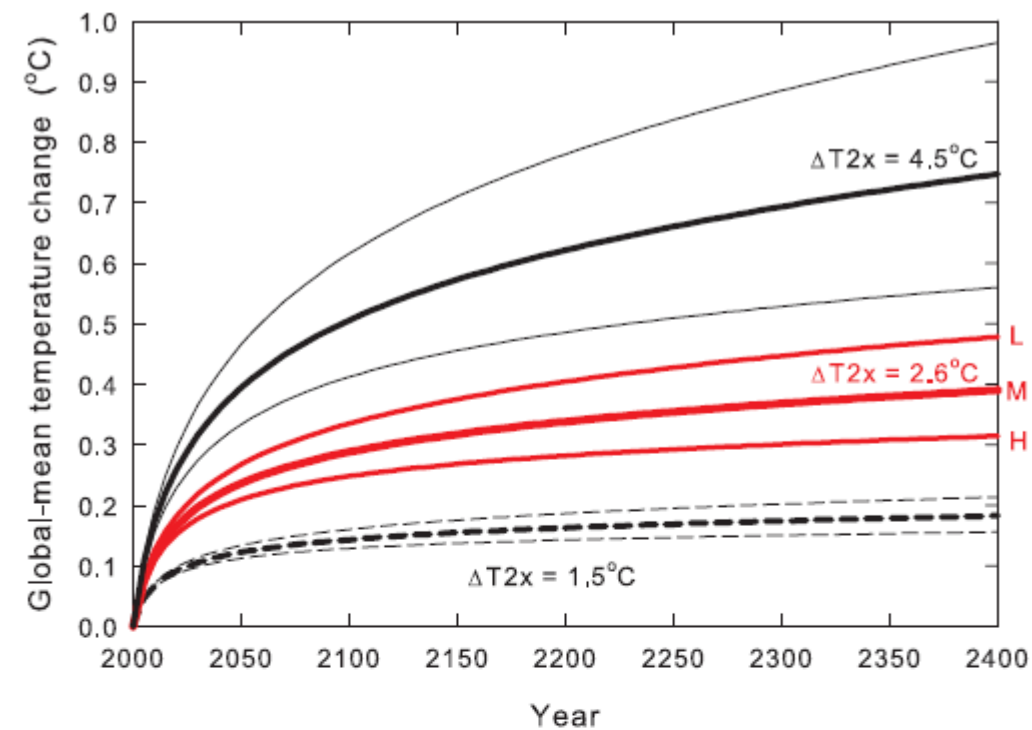
# Inercja klimatu

Inercja klimatu (długi okres potrzebny dla ogrzania oceanów) powoduje, że nawet jeśli ustanie przyczyna (zwiększona emisja gazów cieplarnianych nadal wzrastać będzie temperatura przez kilkaset lat.

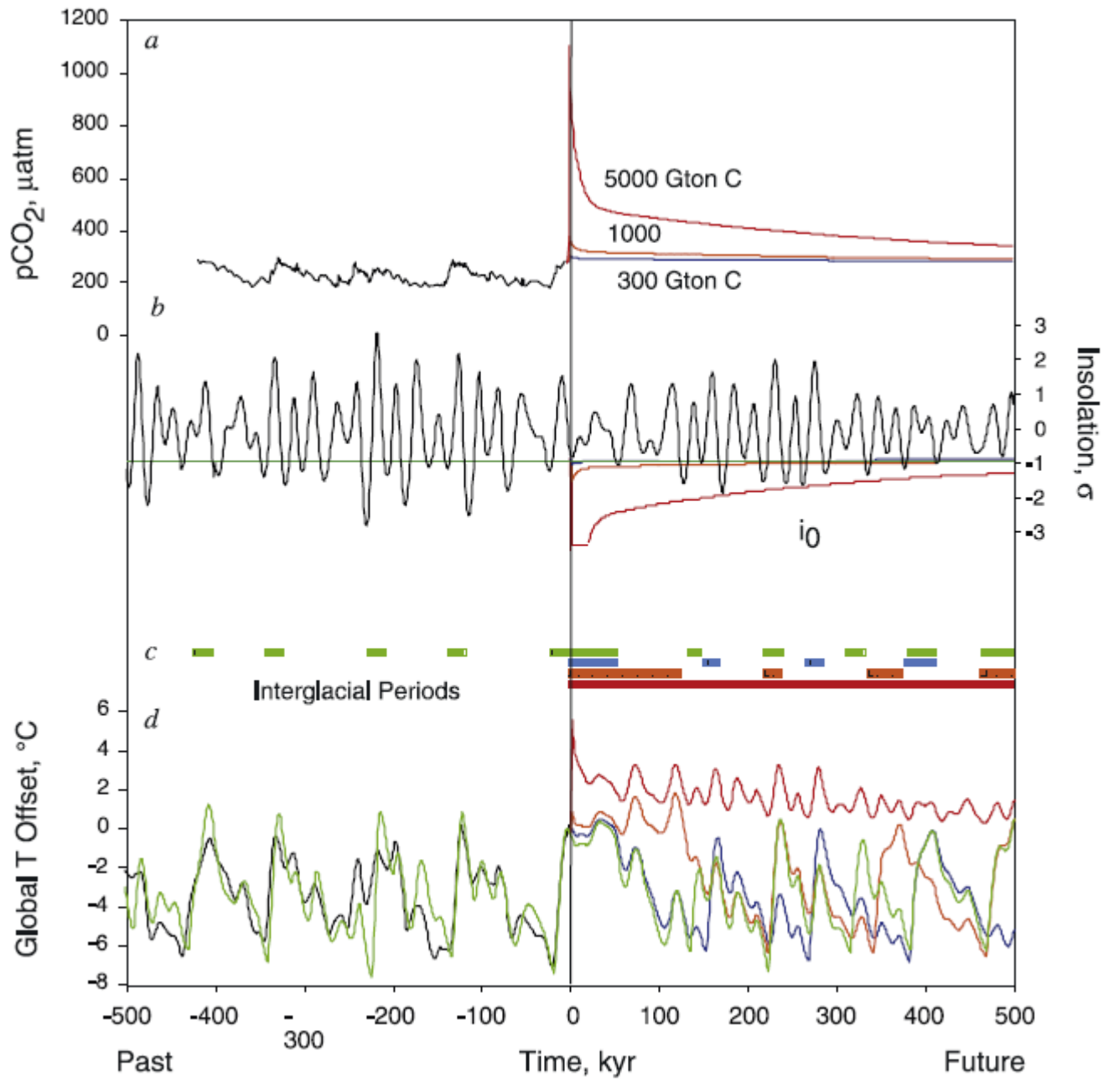
- Na górze: scenariusz natychmiastowego wstrzymania emisji gazów cieplarnianych,
- na dole, utrzymanie dzisiejszej ich emisji.

Rysunki dla trzech wartości czułości klimatu na podwojenie CO<sub>2</sub> z zakresu określonego przez IPCC: 1.5, 2.6 i 4.5 °C. Przy środkowej wartości nawet zatrzymanie naszej cywilizacji dziś spowoduje ok 0.5 °C dalszego wzrostu temperatury.

*Wigley 2005 (Science)*



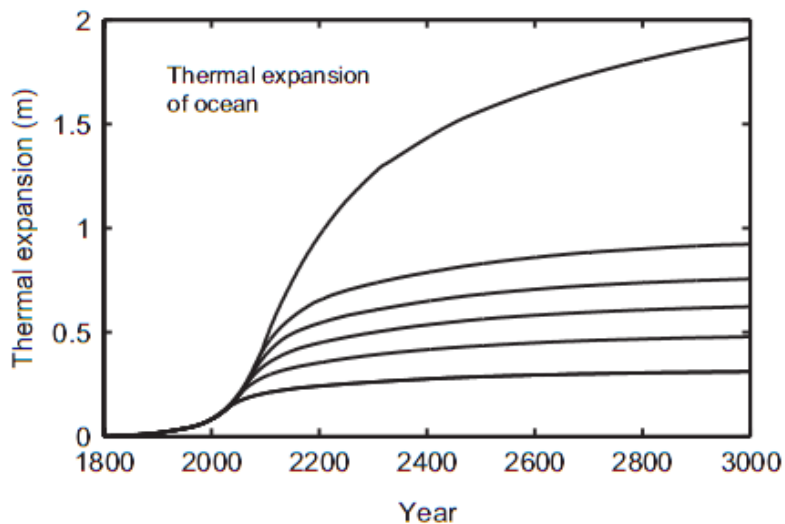
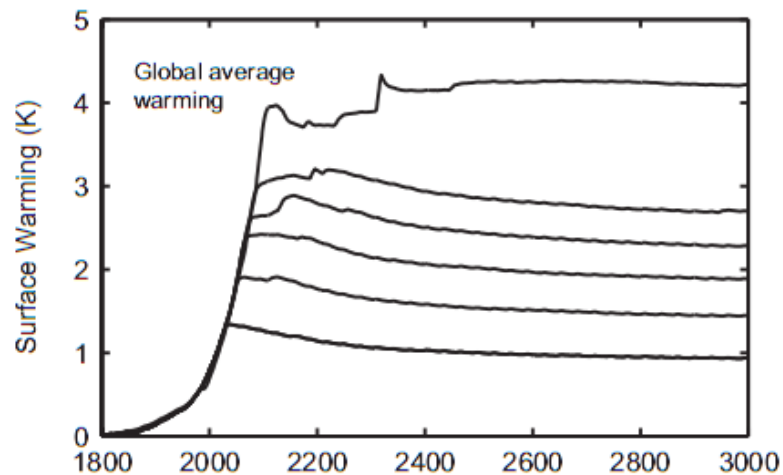
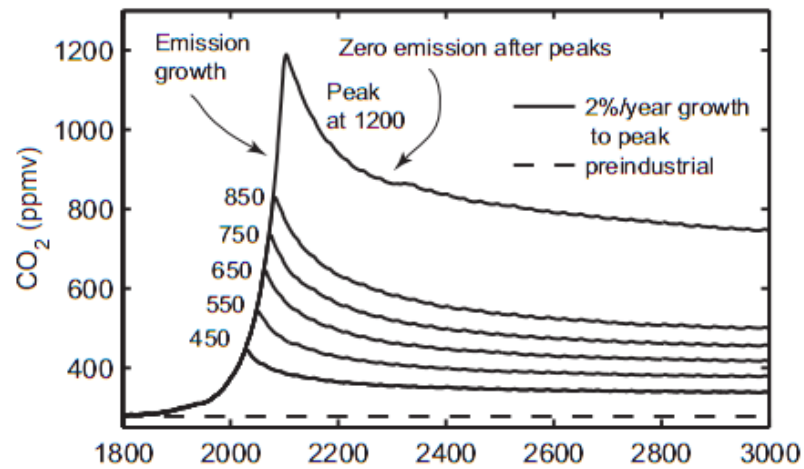
# Możemy powstrzymać epokę lodową nawet na 500k lat



Wg. Archera i Ganopolskiego (model CLIMBER-2) emisja 1000 Gt C (dotąd spaliliśmy 300 Gt C) opóźni nadejście epoki lodowej o ponad 100 tys. lat a spalenie 5000 Gt C (całego zapasu paliw kopalnych) nawet o pół miliona lat.

*Na rysunku od góry: koncentracja  $\text{CO}_2$ , oświetlenie  $65^\circ\text{N}$ , długość interglacjalów, zmiana temperatury*

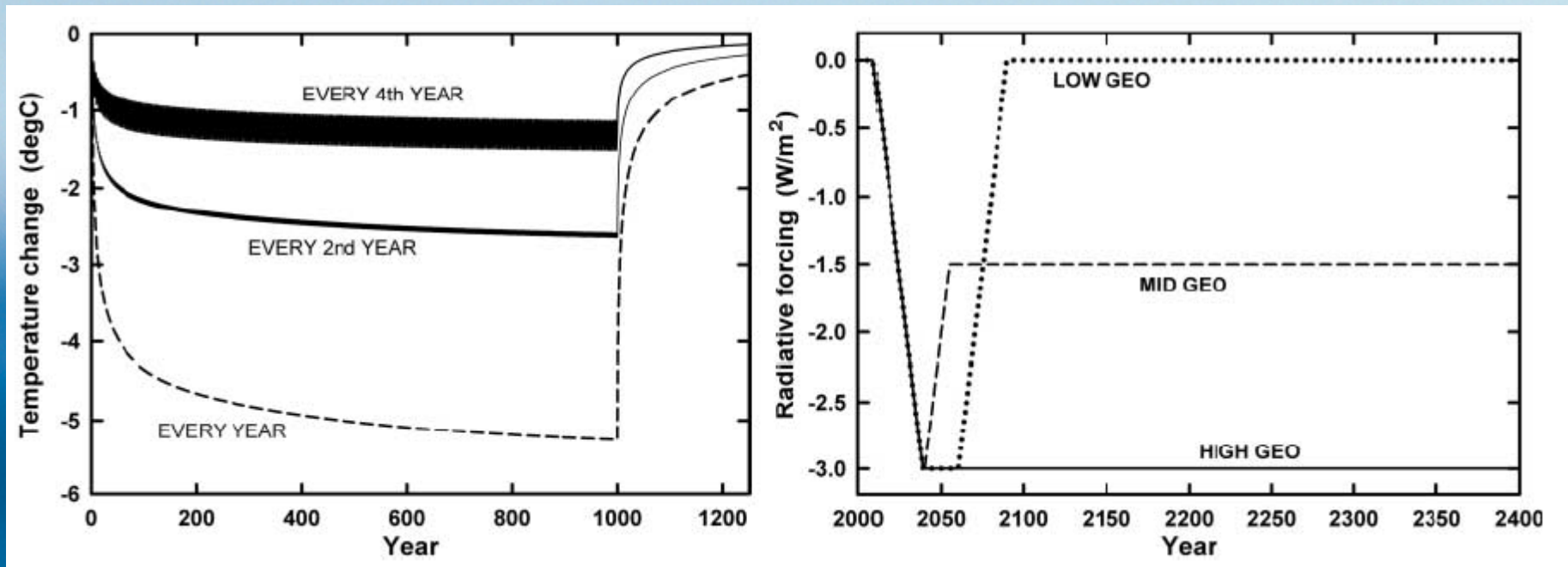
# CO<sub>2</sub> utrzymuje się w systemie ocean-atmosfera przez tysiące lat



Nawet w nieprawdopodobnie optymistycznym wariancie całkowitego wstrzymania emisji CO<sub>2</sub> po osiągnięciu maksymalnej koncentracji atmosferycznej (na górze) jego koncentracja po początkowym spadku i wyrównaniu ciśnień parcjalnych z oceanem będzie podwyższona przez tysiące lat.

Panel środkowy pokazuje związane z tym średnie globalne ocieplenie, a dolny podniesienie się poziomu oceanów wyłącznie pod wpływem rozszerzalności cieplnej wody morskiej (bez topienia lodowców).

# Zwalczanie ognia ogniem: geoinżynieria



Wybuch wulkanu równy wybuchowi Pinatubo z 1991 r. co dwa lata zapewniłby ochłodzenie Ziemi o około 3 stopnie. Wpuszczenie podobnej ilości związków siarki do atmosfery (głównie stratosfery) (wariant HIGH GEO) miałoby zapewnić całkowite powstrzymanie globalnego ocieplenia. Wariant MID GEO zmniejszyłby skutki do wzrostu temperatury 1 °C.

Tylko, czy warto?

# Podsumowanie 2/3

- Trend globalnego ocieplenia widoczny jest w danych naziemnych, satelitarnych i balonów meteorologicznych (szczególnie po poprawieniu błędów pomiarowych w 1998 i 2005 roku)
- Szybkiego globalnego ocieplenia w drugiej połowie XX wieku nie da się wytłumaczyć zwiększoną aktywnością Słońca (w przeciwieństwie do zmian w czasie poprzednich kilku wieków)
- Modele klimatyczne wskazują na dalsze ocieplanie Ziemi od 1-6 °C stopni do końca bieżącego stulecia (zależnie od scenariusza i założonej czułości klimatu na podwojenie koncentracji dwutlenku węgla).
- Nawet natychmiastowe zaprzestanie emisji gazów cieplarnianych spowoduje ocieplenie o ok. 0.5 °C (inercja klimatu).
- Emisja CO<sub>2</sub> może odroczyć epoki lodowe nawet o pół miliona lat.
- Aby zatrzymać ocieplenie trzeba by odpalać wulkan Pinatubo co 2 lata.

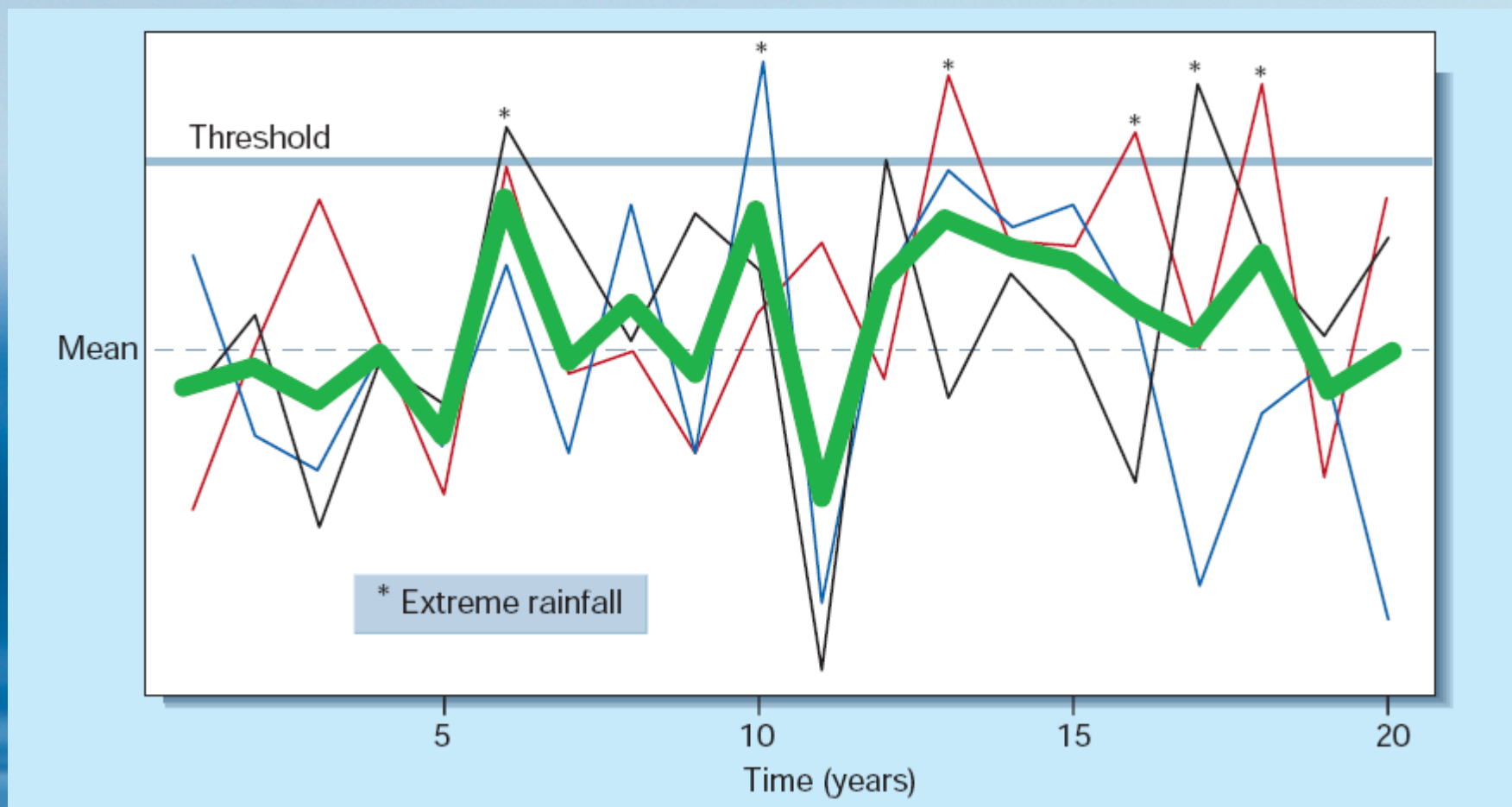


*Blue Sky, superkomputer produkcji IBM używany do modelowania klimatu w National Center for Atmospheric Research*

Wrocław AD 1997: przykład zjawisk ekstremalnych nowego klimatu Polski?

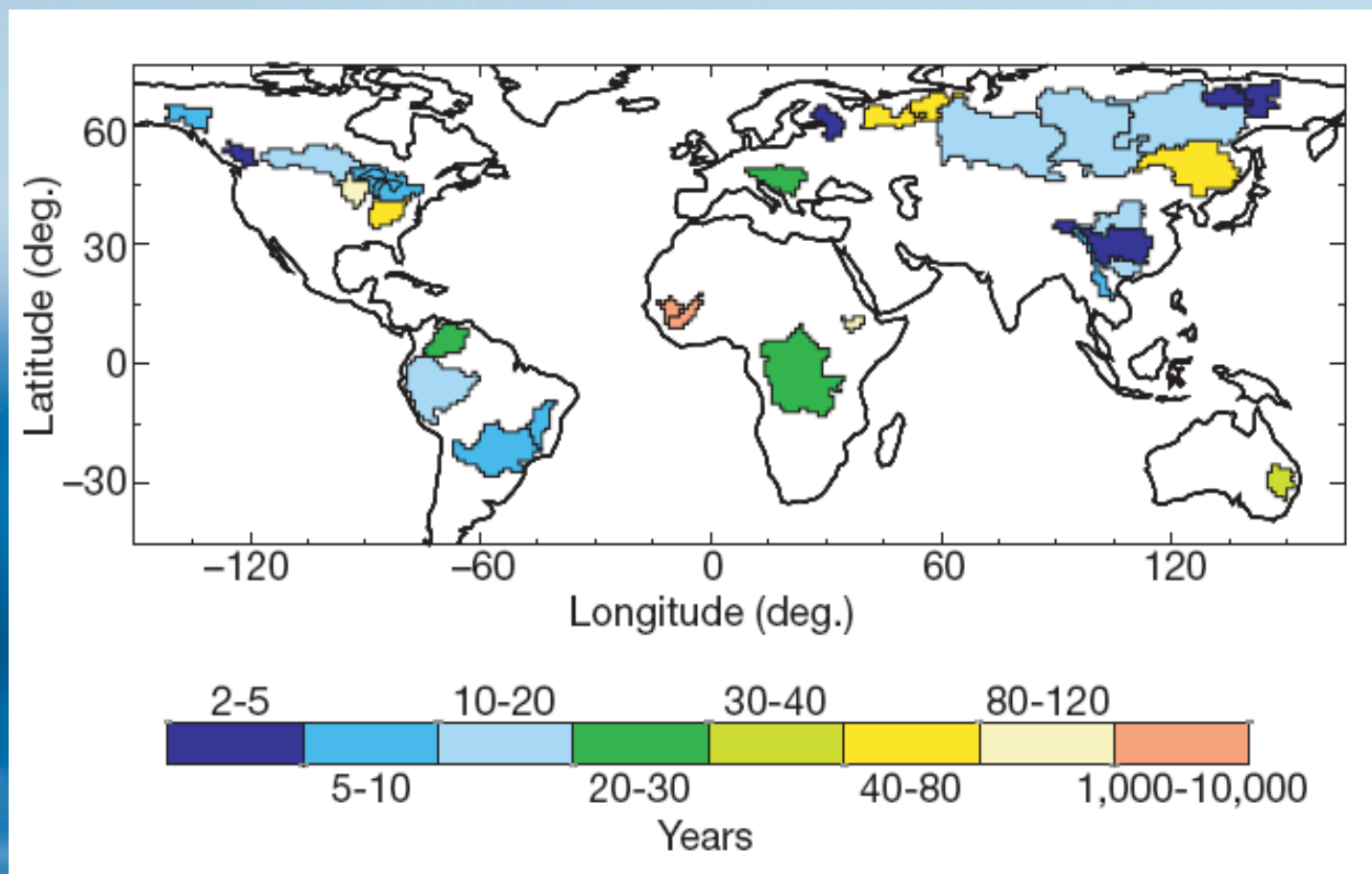


# Dlaczego podejście IPCC zaniża zjawiska ekstremalne?



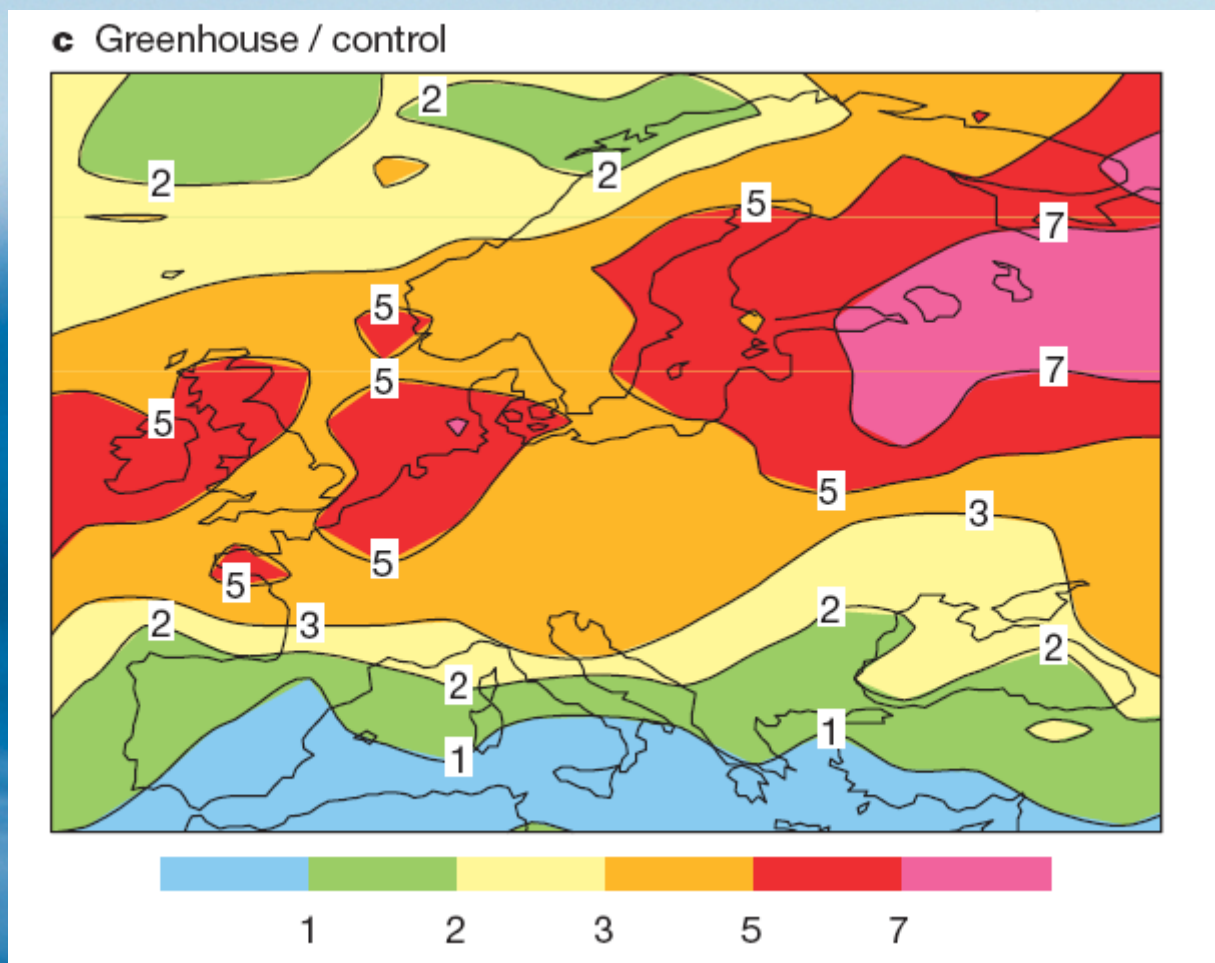
Uśrednianie wyników wielu modeli, a nawet (jak na rysunku powyżej) kilku przebiegów pojedynczego modelu zawsze zmniejsza częstotliwość zdarzeń ekstremalnych. Na rysunku każdy z trzech przebiegów przekracza gdzieś pokazany próg a średnia ani razu.

# Większa częstotliwość powodzi w świecie cieplarnianym



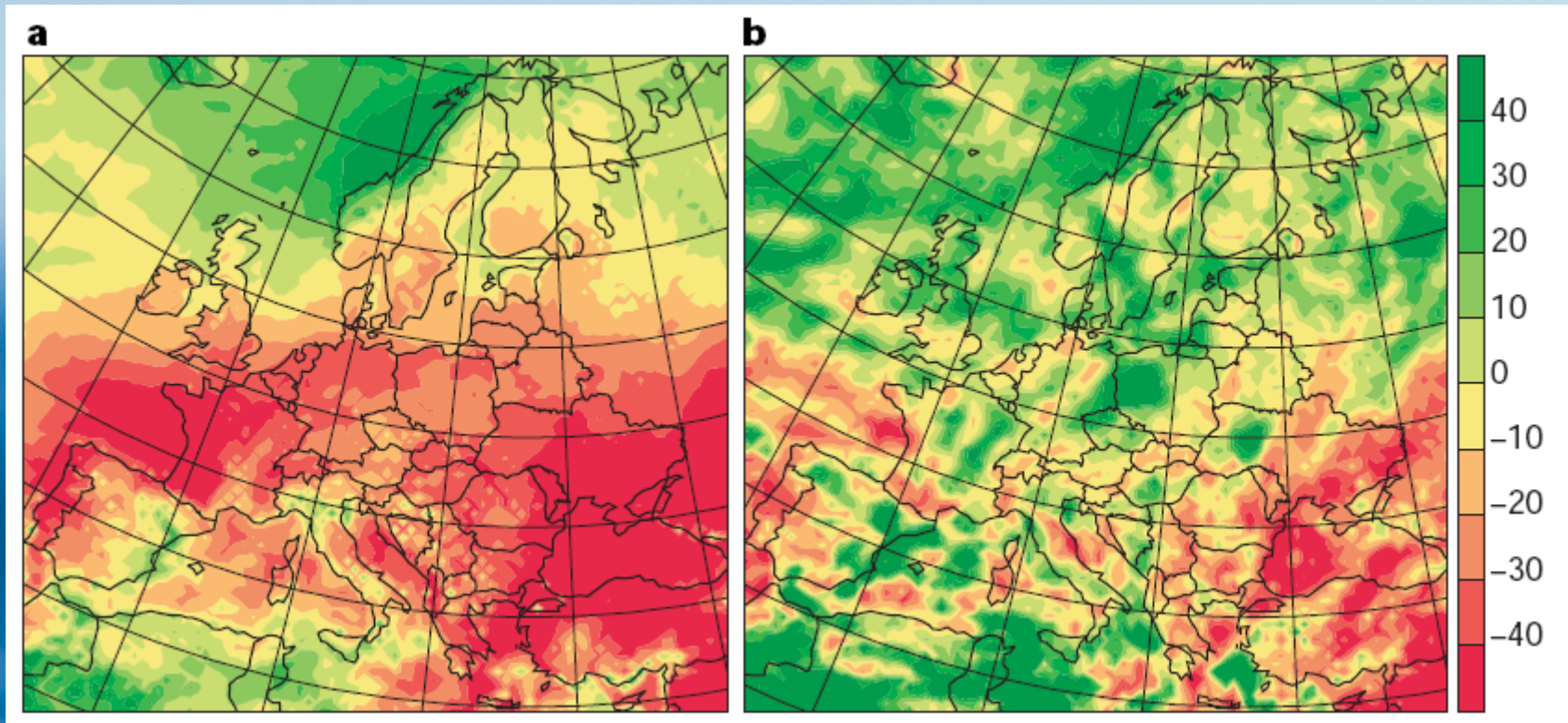
Częstotliwość wystąpienia „powodzi stulecia” (zdefiniowanej przy obecnym klimacie) po zwiększeniu koncentracji CO<sub>2</sub> czterokrotnie dla 29 dużych basenów rzecznych. W niektórych rejonach (zwraca uwagę dorzecze Newy nad Bałtykiem) „powodzie stulecia” mogą w przyszłości występować nawet kilkakrotnie w ciągu dekady.

# Ekstremalne opady zimą w Europie: częściej



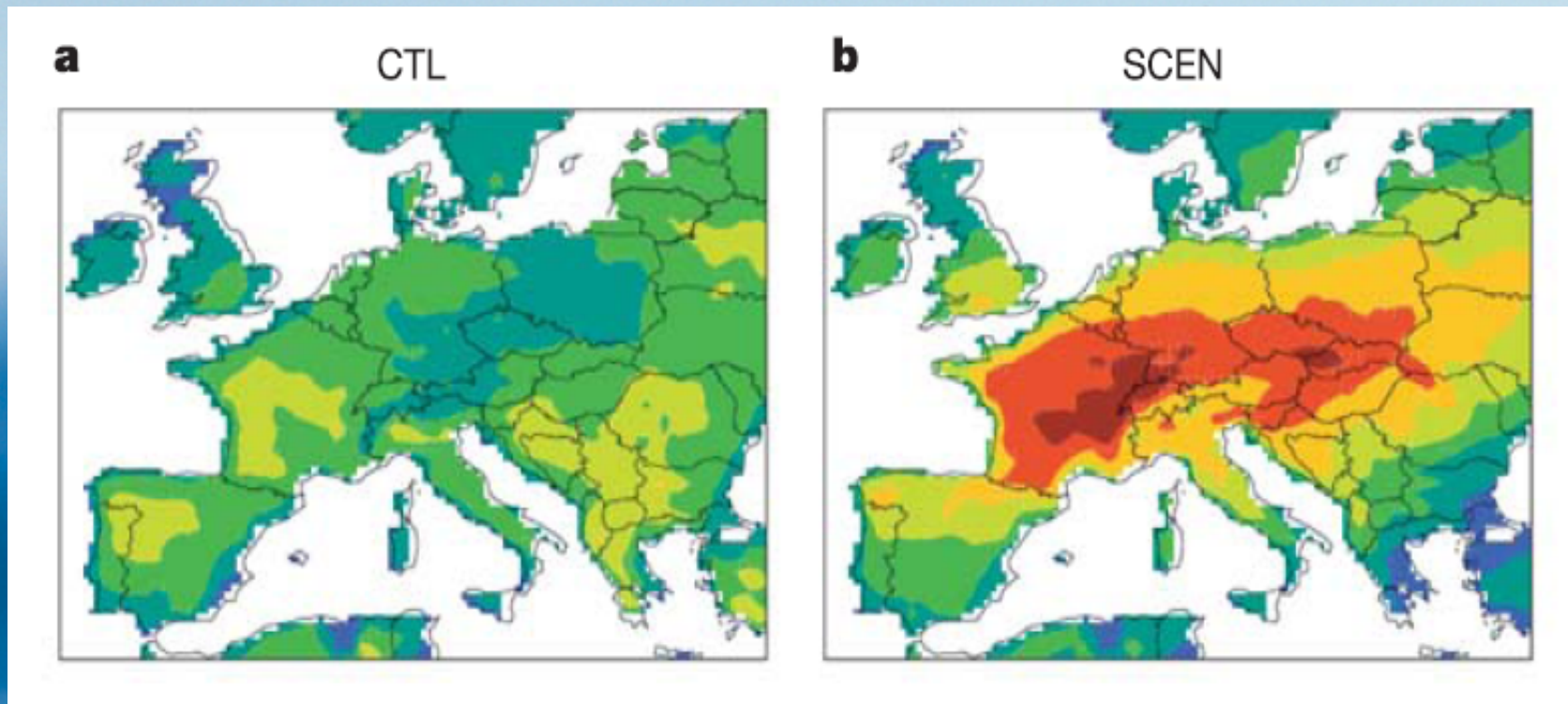
Zwiększenie częstotliwości wystąpienia szczególnie mokrych zim w świecie cieplarnianym w stosunku do obecnego (z 19 modeli używanych przez IPCC).

# Opady latem w Europie: więcej i częściej



Według regionalnego modelu duńskiego HIRHAM4, dla scenariusza A2, opady letnie (lipiec-sierpień) w środkowej Europie zmaleją (*uwaga na nieintuicyjny dobór kolorów!*), jednak opady ekstremalne występują częściej. Letnie powodzie w Europie Środkowej występujące prawie corocznie od dziesięciu lat wydają się potwierdzać tę tendencję.

# Zmiany stref klimatycznych

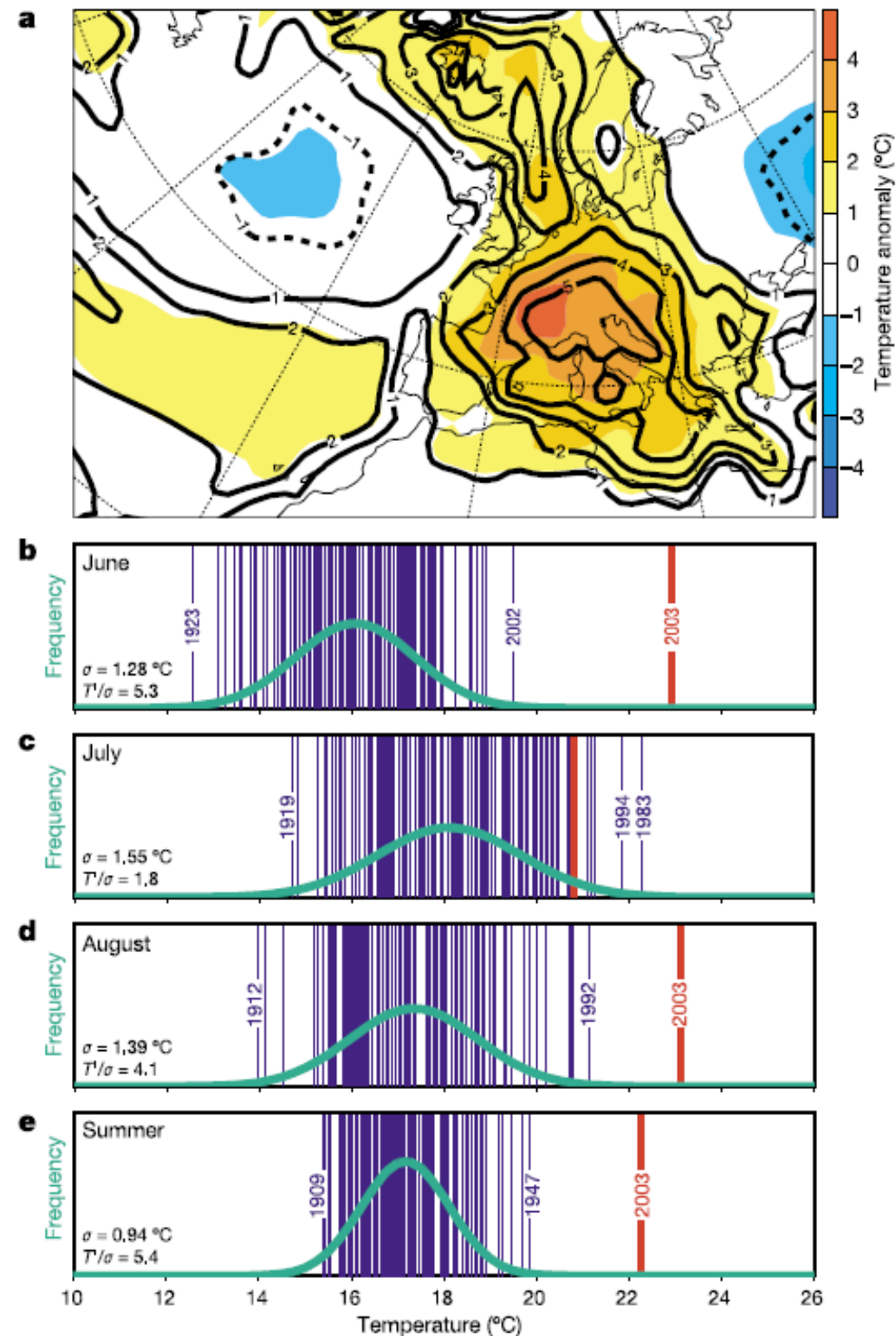


Zmienność międzyroczna letnich temperatur w świecie obecnym (CTL) i w końcu XXI wieku (SCEN) scenariusza A2. Widać, że pas największej zmienności przesuwa się znad okolic Morza Śródziemnego nad Europę Środkową. Spowodowane jest to przesuwaniami się stref klimatycznych na północ. Granica suchego klimatu subtropikalnego i wilgotniejszego klimatu umiarkowanego może w przyszłości przechodzić przez Polskę, z tym że nie corocznie.

# Fala upałów z 2003 r.

Fala upałów w Europie latem 2003 spowodowała co najmniej 35,000 dodatkowych zgonów była bez precedensu od czasu powstania sieci pomiarów meteorologicznych.

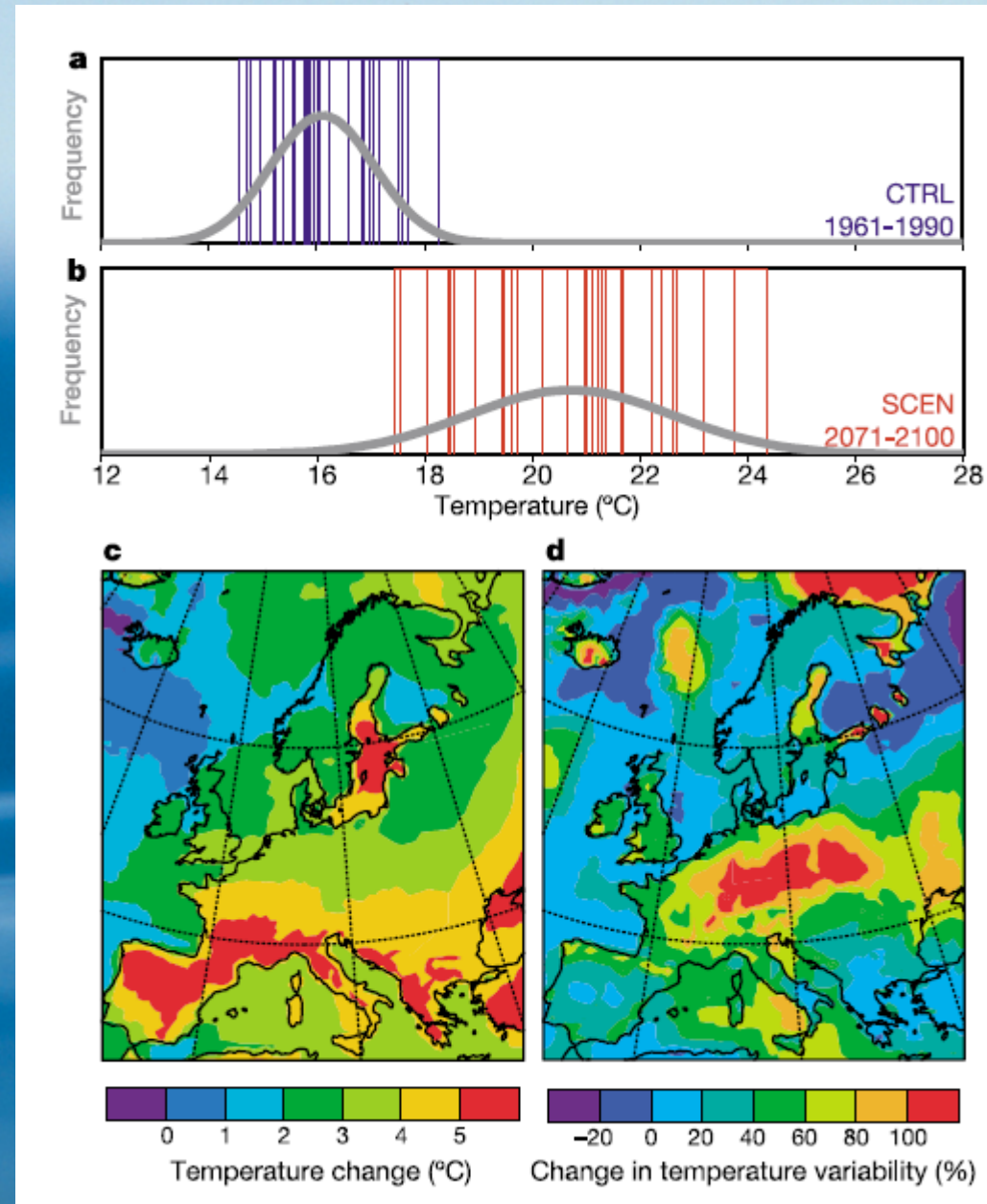
*Na rysunku: anomalia letniej temperatury oraz rozkład średnich temperatur miesięcy letnich (czerwca, lipca, sierpnia i całego lata) od 1864 dla stacji meteorologicznych północnej Szwajcarii (najdłuższa nieprzerwana seria danych w tym rejonie).*



# Rok 2003 typowym rokiem XXI wieku?

Wyniki modelowania regionalnym modelem klimatycznym RCM wskazują, że lato 2003 będzie typowym (trochę cieplejszym niż przeciętna) latem końca XXI wieku (rozkład wartości wymodelowanych temperatur letnich północnej Szwajcarii w latach 1961-1990 oraz 2071-2100)

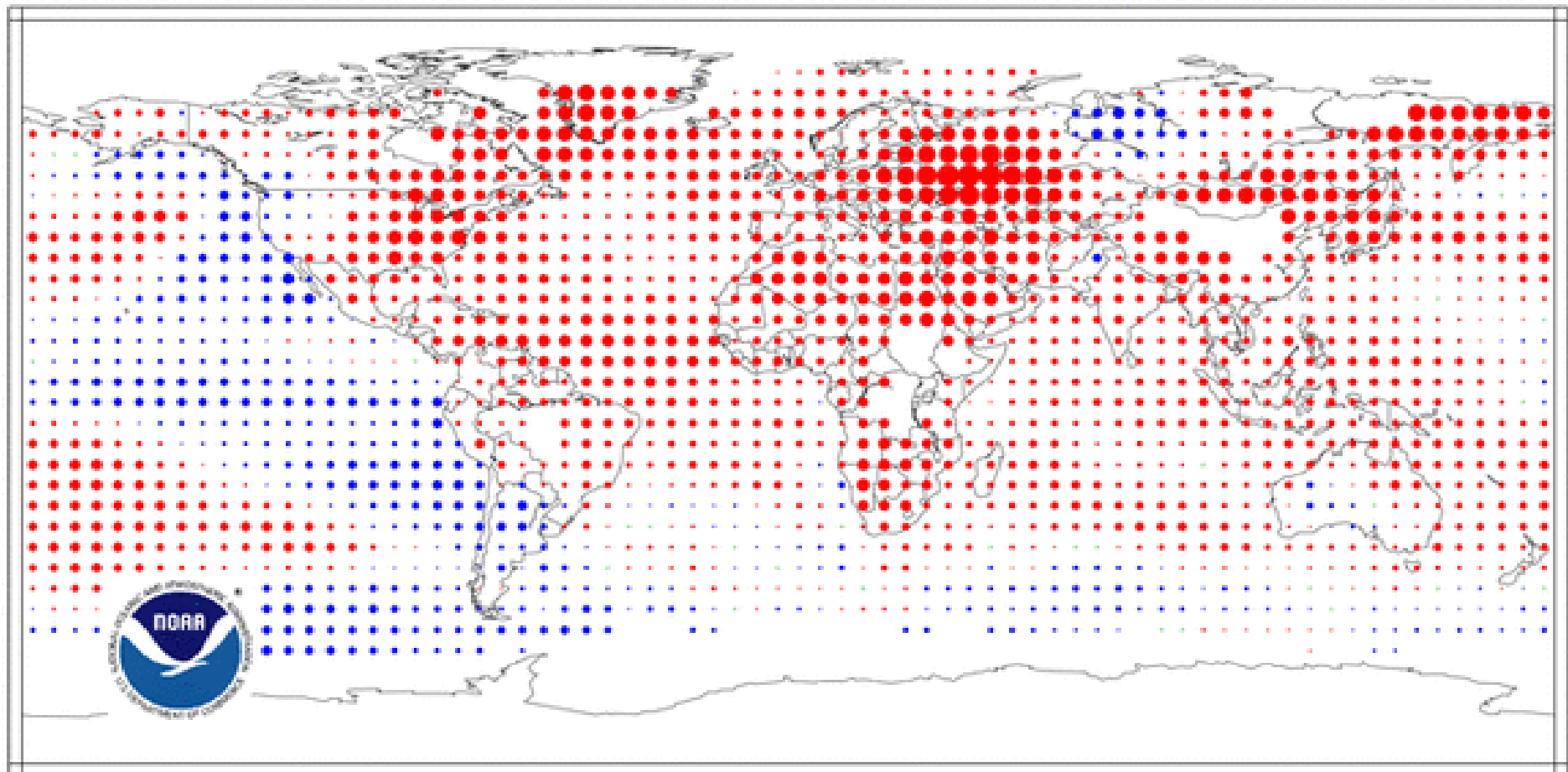
Poniżej zmiana średniej temperatury lata i ich międzyrocznej zmienności między CTRL a SCEN.



# Temperature Anomalies Jun-Aug 2010

(with respect to a 1971-2000 base period)

National Climatic Data Center/NESDIS/NOAA



Degrees Celsius



Winters in Northern Europe will be less severe.



Arctic permafrost will thaw.



The Mediterranean region will dry out.



Savanna will replace tropical forests.



Rising sea level will increase coastal flooding.

## IPCC's Projected Impacts

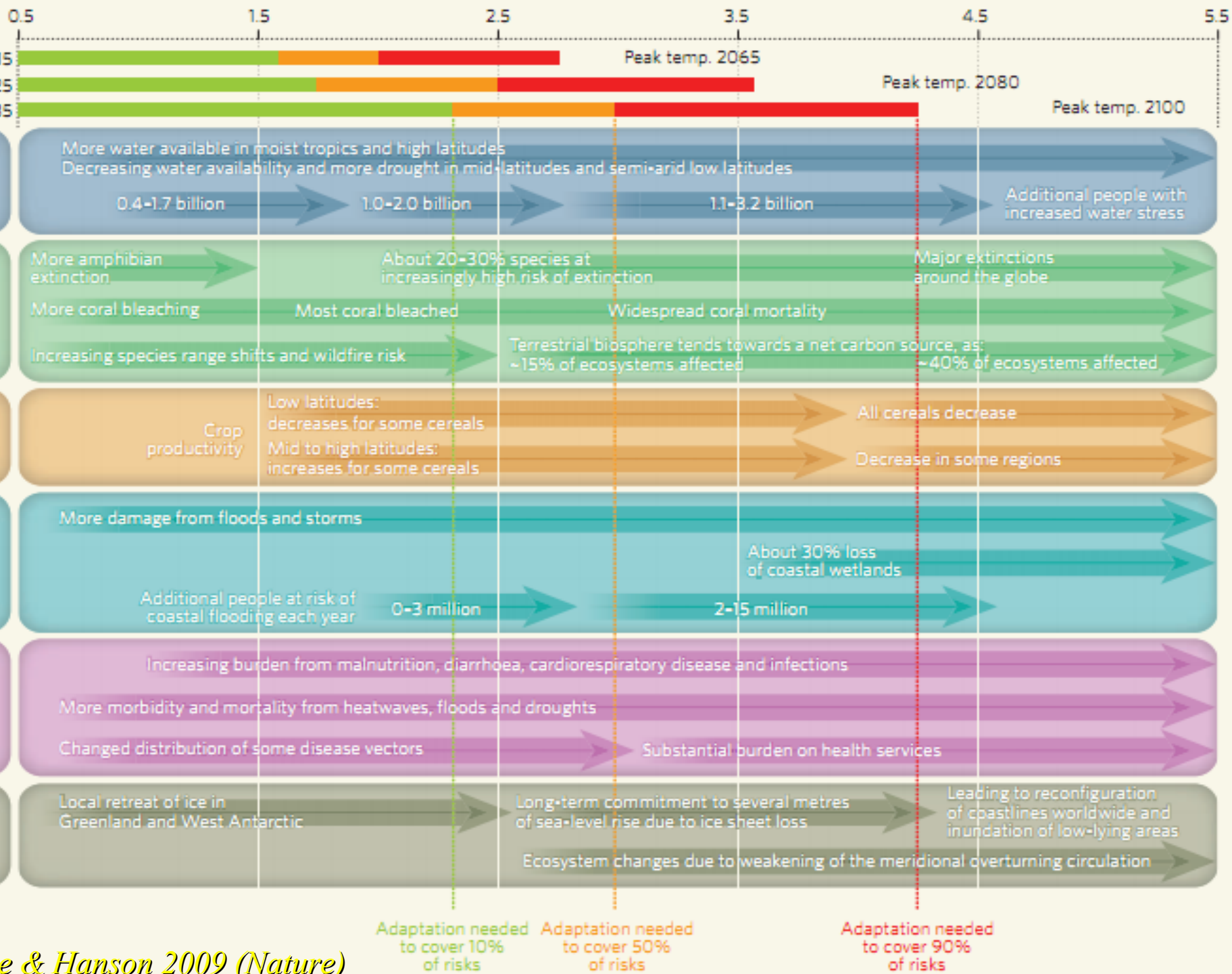


Mountain glaciers will disappear.

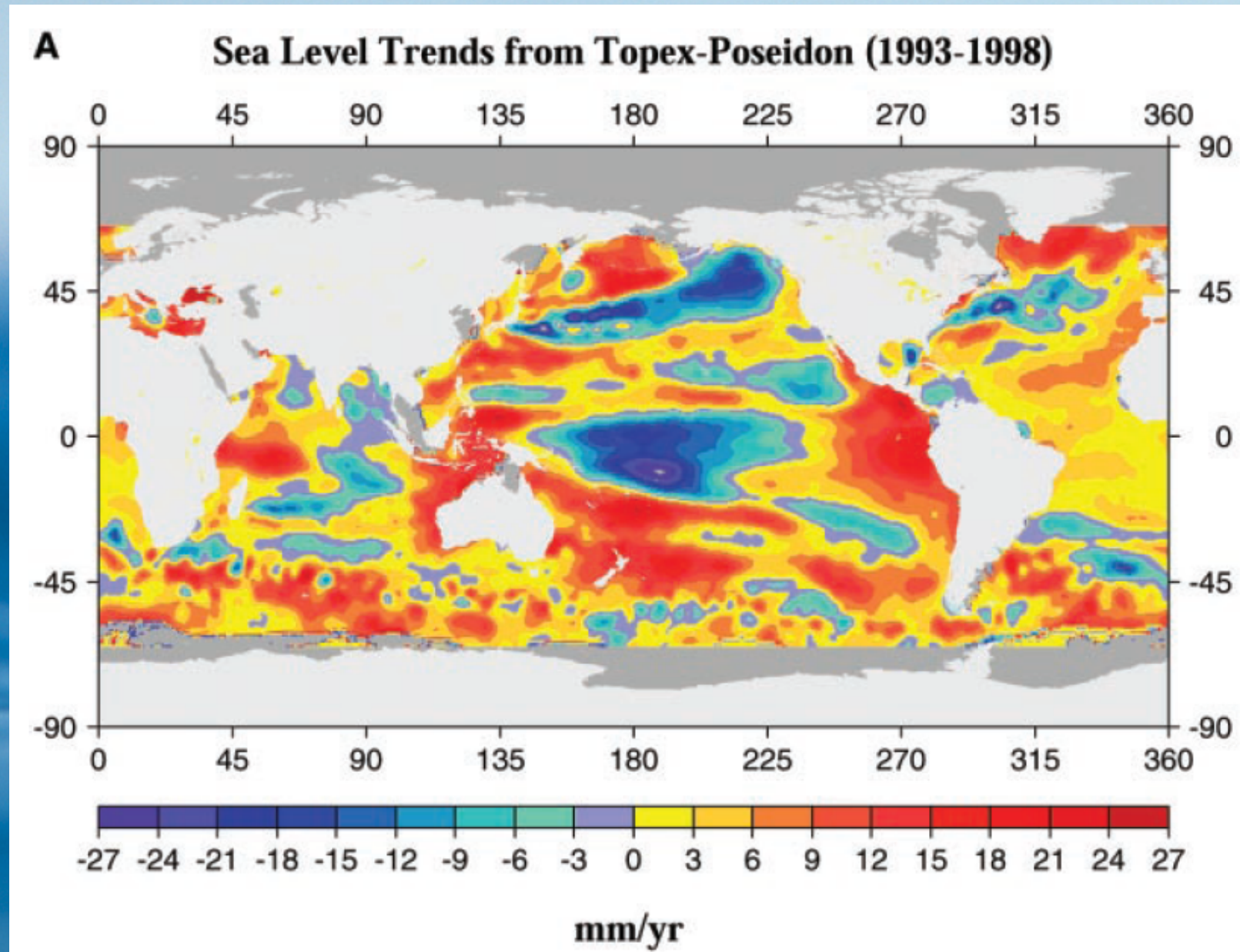


Most corals will suffer major declines.

Global mean change from pre-industrial temperatures (°C)



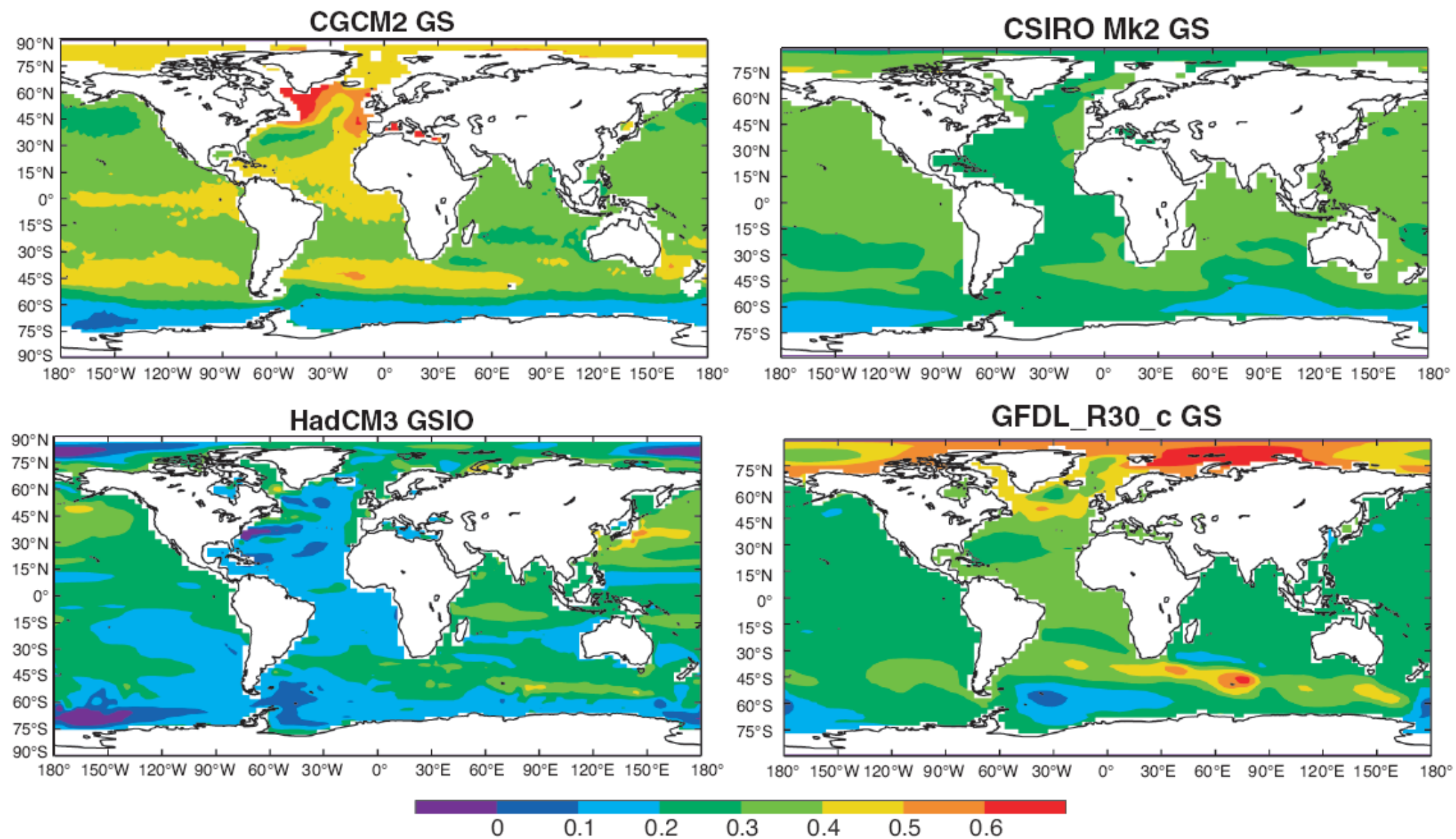
# Zmiany poziomu morza mierzone satelitarnie



Średnio (1993-2003) poziom morza podnosi się o  $3.1 \pm 0.7$  mm/rok z czego rozszerzane termiczne to  $1.6 \pm 0.5$  mm/rok (*Raport IPCC, 2007*).

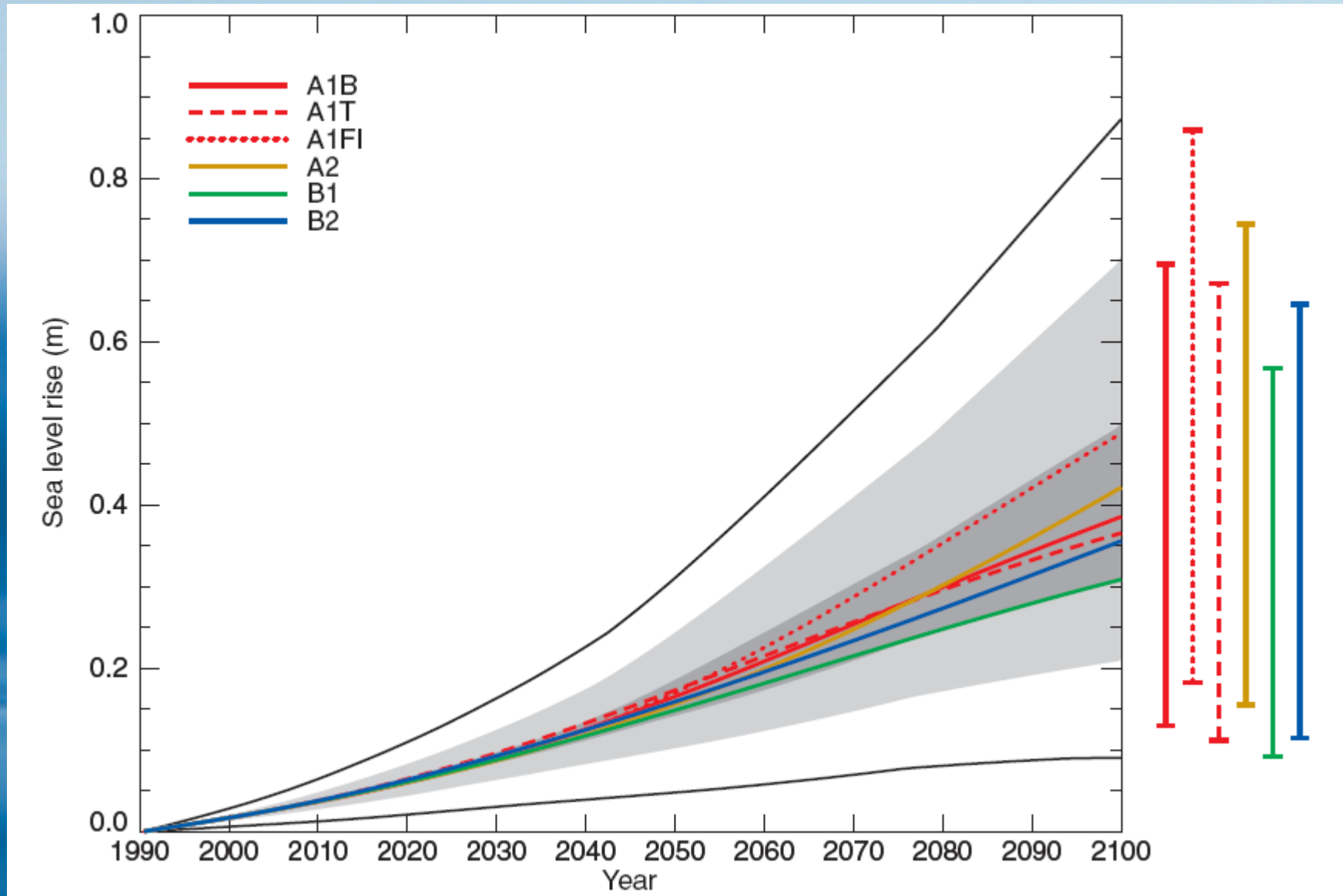
*Cabanes, Casenave & Le Provost 2001 (Science)*

# Nie umiemy zbyt dobrze modelować rozkładu przestrzennego



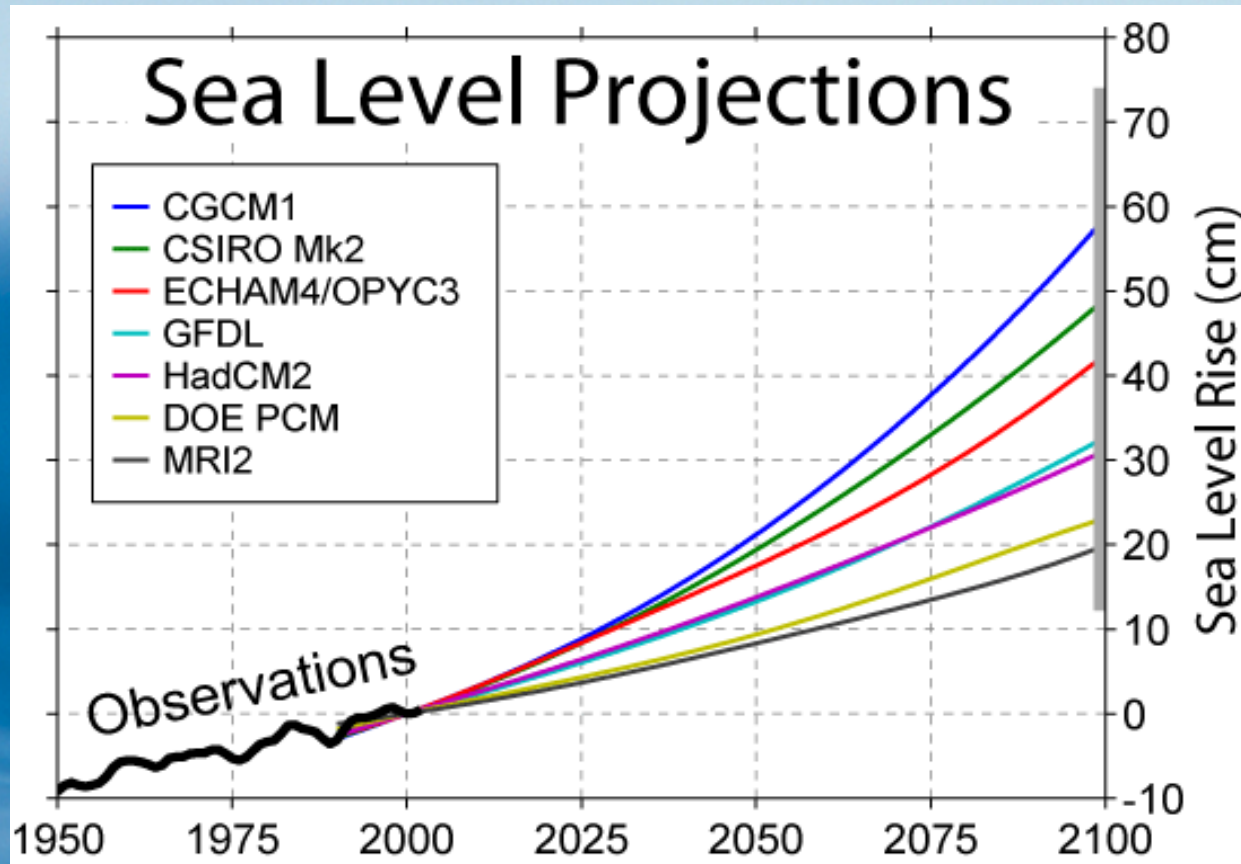
Cztery z modeli używanych przez panel IPCC dają zupełnie inny rozkład przestrzenny zmian poziomu morza dla XXI wieku (wartości w m/stulecie).

# Przewidywane zmiany poziomu morza



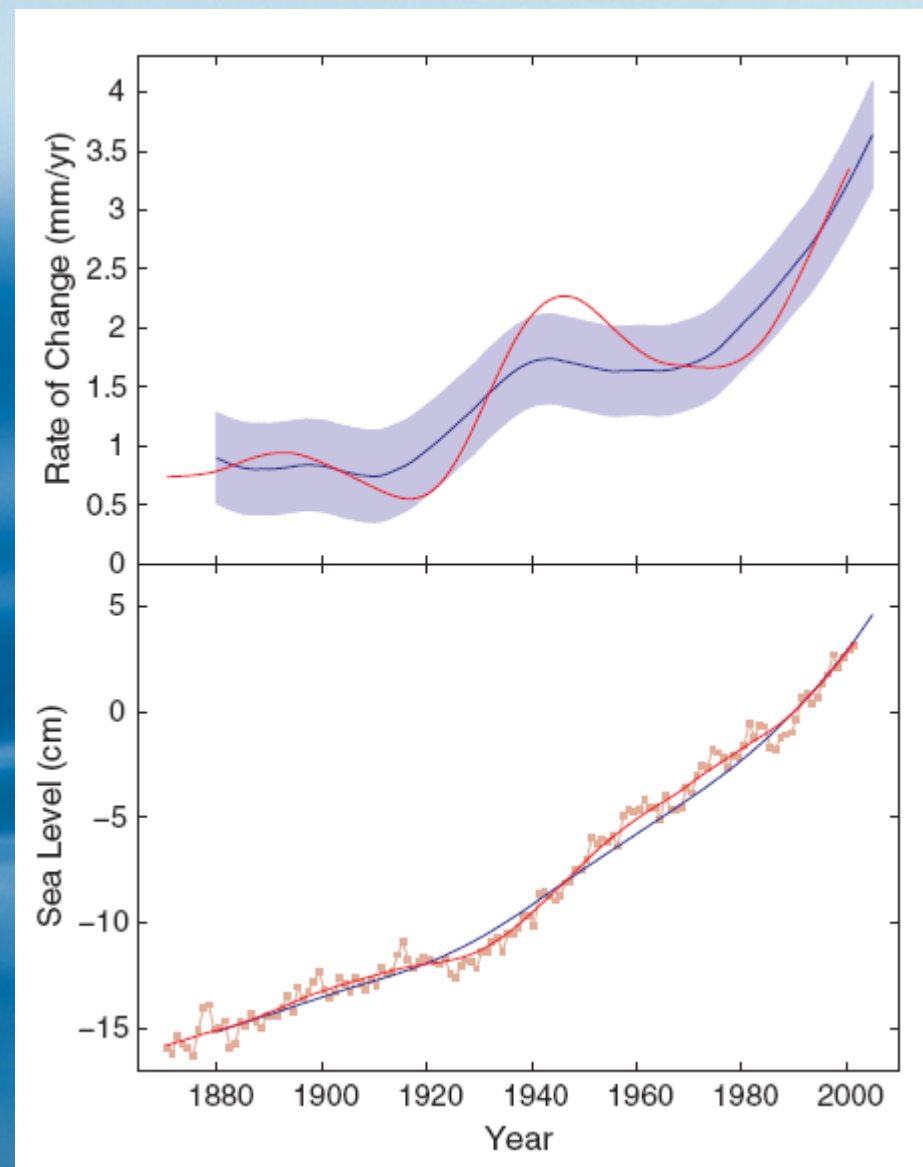
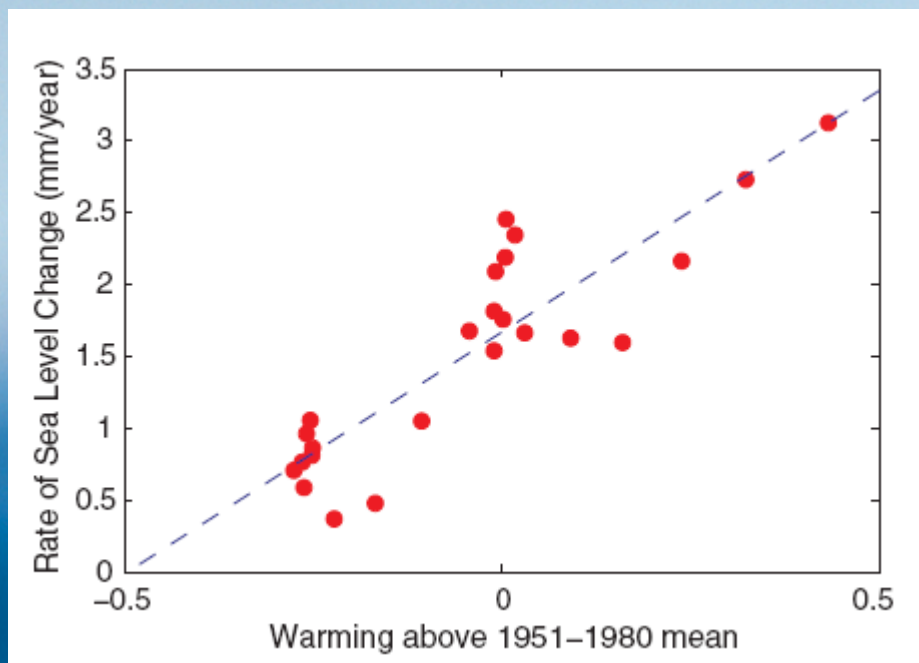
Zwraca uwagę niższa wartość części zakresów niż obecne (1993-2003) tempo podnoszenia się średniego poziomu morza.

# Rozrzut wartości wyliczanych różnymi modelami



Rozrzut prognoz wzrostu poziomu morza dla scenariusza IS92a wykonana za pomocą szeregu modeli klimatycznych.

# Przyrost poziomu morza proporcjonalny do temperatury?



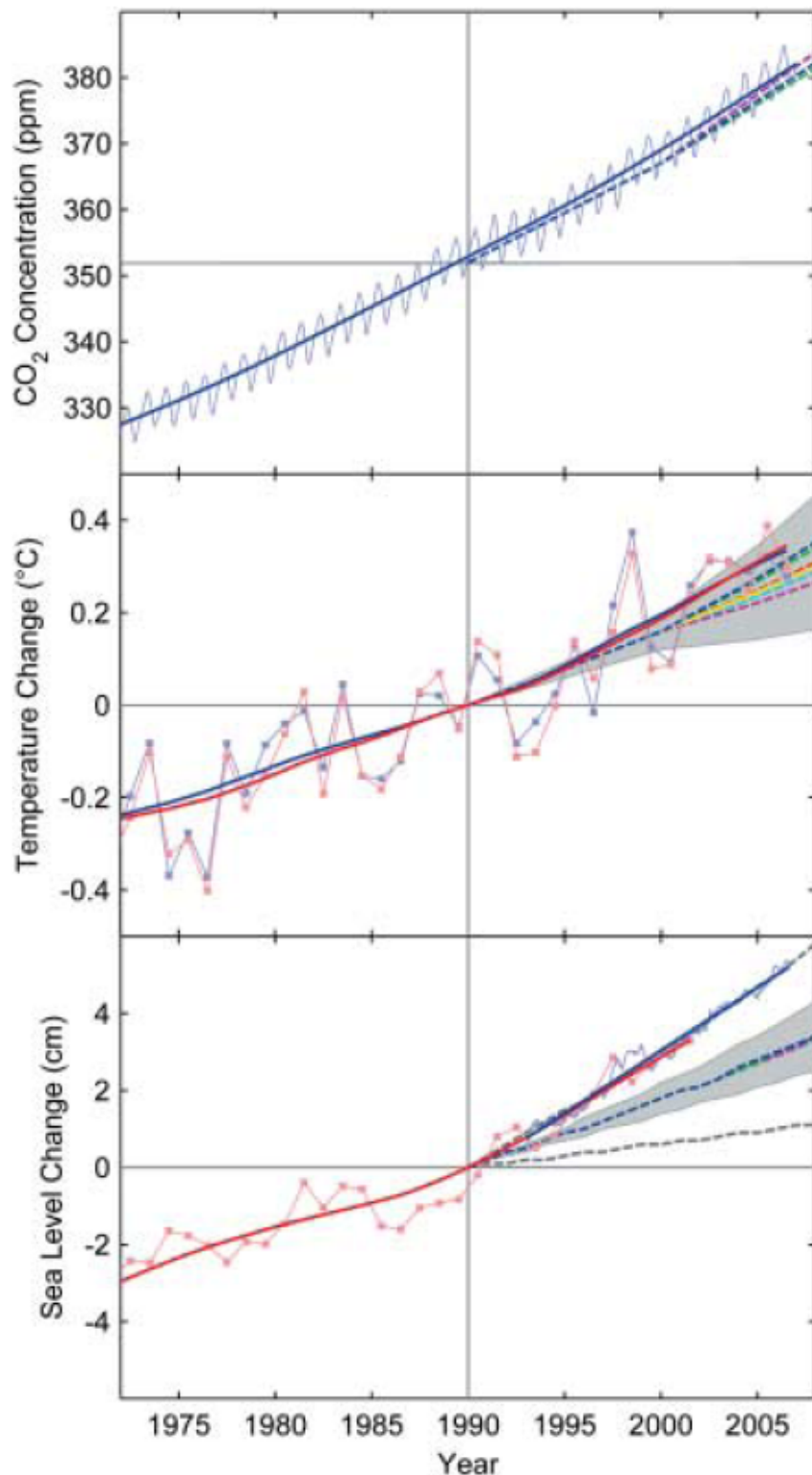
Dotychczas tempo przyrostu poziomu morza korelowało ( $r = 0.88$ ) z przyrostem temperatury (na górze).

Po prawej zmierzone (czerwone) wygładzone temp przyrostu poziomu morza oraz wyliczone w liniowej zależności (zaznaczono odchylenie standardowe). Poniżej wartość poziomu (czerwone) morza i scałkowane wyliczone wartości przyrostu (niebieskie)

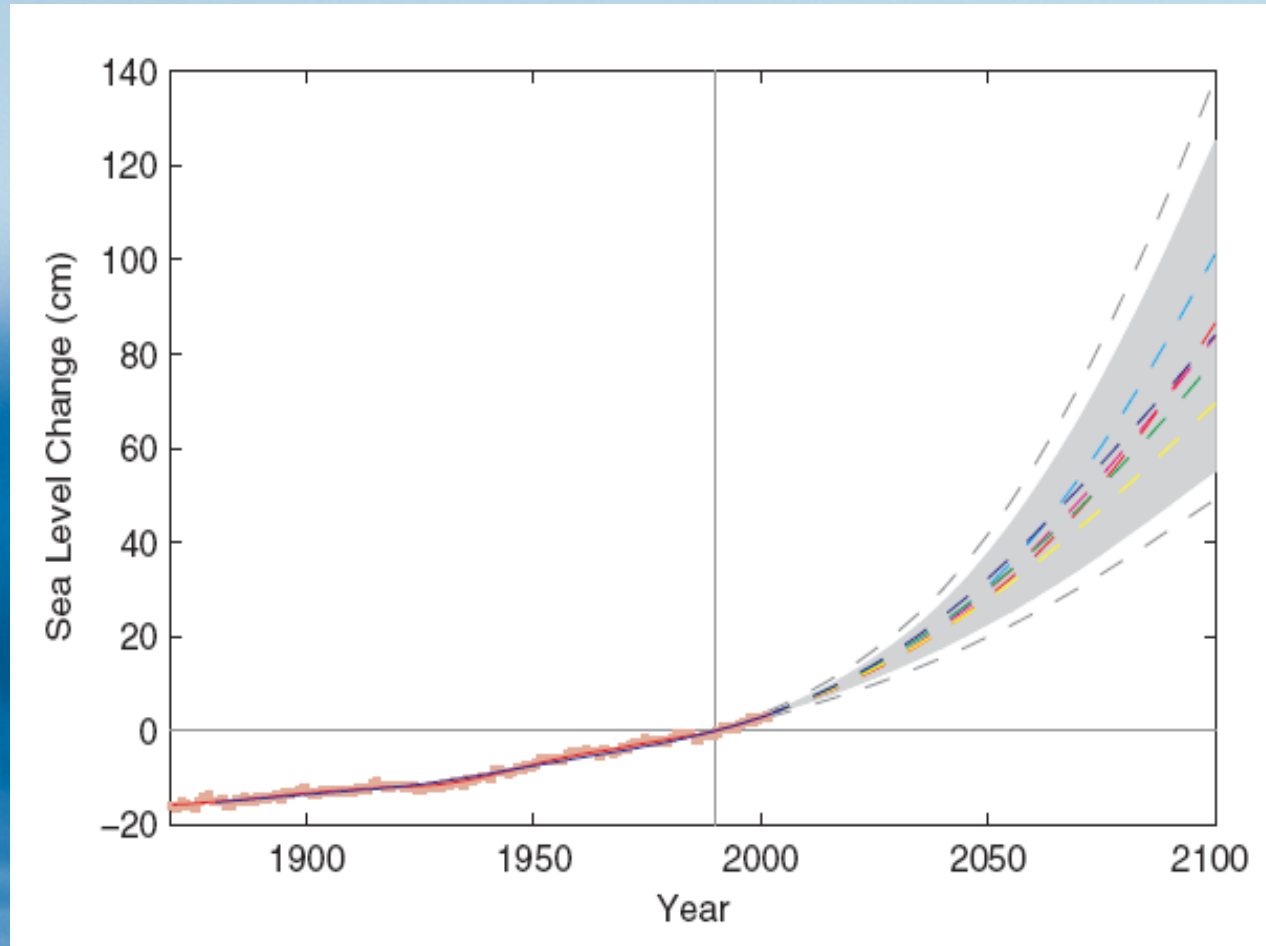
## Już się nie zgadza...

Scenariusze IPCC zaczynają się od roku 1990. Wzrost temperatury w latach 1990-2006 (ciągłe linie na środkowym panelu) pod wpływem przyrostu CO<sub>2</sub> (górny panel) mieści się w górnej części zakresu prognoz IPCC (przerywane linie to prognozy dla czułości  $\Delta T_{2x} = 3.0$  °C a szara strefa to zakres 1.7-4.2 °C).

Jednak prognozy IPCC dla wzrostu poziomu morza (przerywana niebieska linia i zakres zmienności na dolnym panelu) niedoszacowują pomiary satelitarne (ciągła niebieska linia) i z wodowskazów (ciągła czerwona). Centralna prognoza IPCC to 2 mm/rok a trend z pomiarów to 3.3 mm/rok.

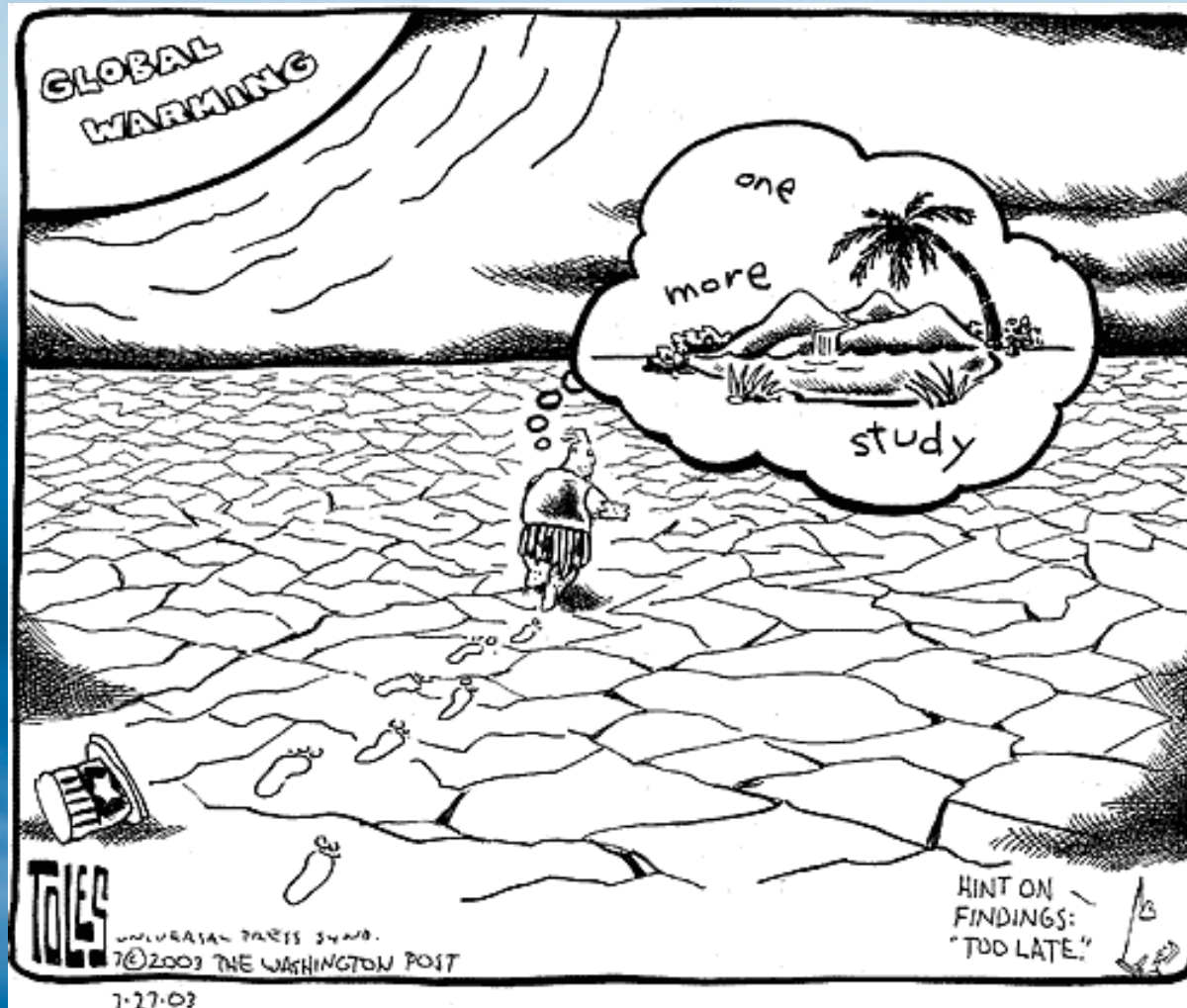


# Prognozy poziomu morza IPCC stanowczo zaniżone?



Raport IPCC z 2001 roku szacuje wzrost poziomu morza w XXI wieku na 21-77 cm/wiek. Wyliczone wartości przyrostu poziomu morza na podstawie liniowej zależności Rahmstorfa i prognoz wzrostu temperatury z raportu IPCC dają wartość 55-125 cm/wiek (50-140 cm/wiek po uwzględnieniu błędu statystycznego zależności).

# Ile jeszcze wyników potrzeba sceptykom?



Rysunek z “Washington Post” przedstawia administrację amerykańską marzącą o „jeszcze jednym badaniu”, które wreszcie udowodni, że nie ma globalnego ocieplenia.

# Podsumowanie 3/3

- Według wyników modelowania obecny wiek przyniesie nie tylko gorętszą ale i bardziej zróżnicowaną pogodę.
- W Polsce należy spodziewać się ekstremalnych opadów (powodzi) zimą i latem oraz coraz częstszych silnych fal letnich upałów.
- W południowej Europie i południowo-zachodnich USA należy spodziewać się suszy (i być może powrotu „*dust bowl*” z lat 1930-ch)
- Panel IPCC przewiduje w XXI wieku podwyższenie się poziomu morza o 21-77 cm.
- Wynik ten wydaje się niespójny z prognozami ocieplenia w tym samym raporcie. Jeśli zmiany poziomu morza proporcjonalne są do temperatury ( a dotychczas były), należy spodziewać się zmian o 50-140 cm.
- Skąd się weźmie ta woda? O tym w następnym odcinku...



„*Dust bowl*” - Oklahoma 1935

Dziękuję za uwagę



Za tydzień (24.1.2011 r.) ostatni wykład:  
Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych

*Niedźwiedź polarny: ofiara globalnego ocieplenia?*