

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 4:

Holocen: klimat, ocean a cywilizacja,  
(stała słoneczna i wulkanizm)

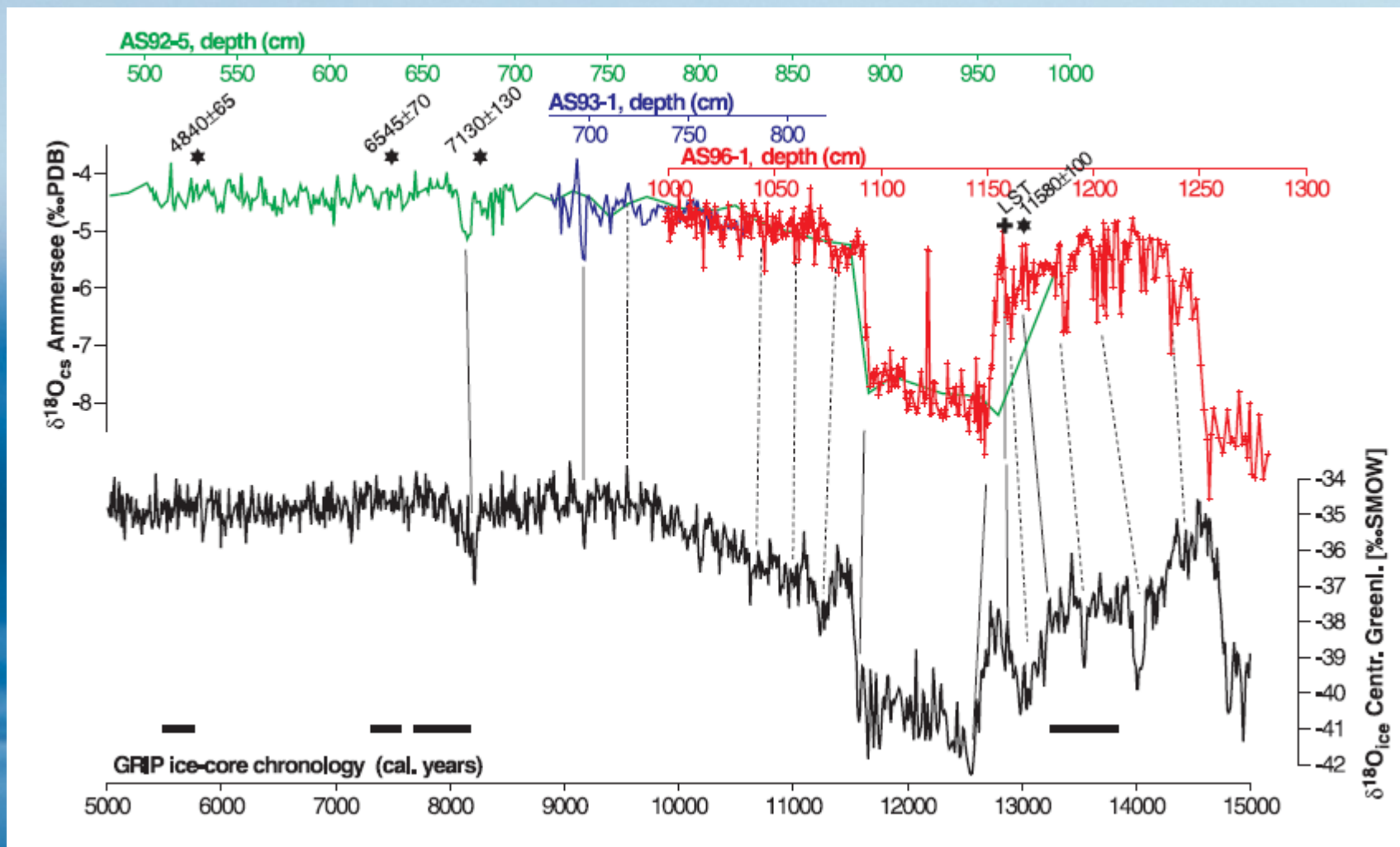
Jacek Piskozub

Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2017/18 r.

# Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów październik '17 – styczeń '18

- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacacja, zmienność “suborbitalna”*)
- ✓ **Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (stała słoneczna i wulkanizm)**
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (*cyrkulacja termohalinowa*)
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadalej (*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

# Czy holocen był rzeczywiście tak klimatycznie nudny?



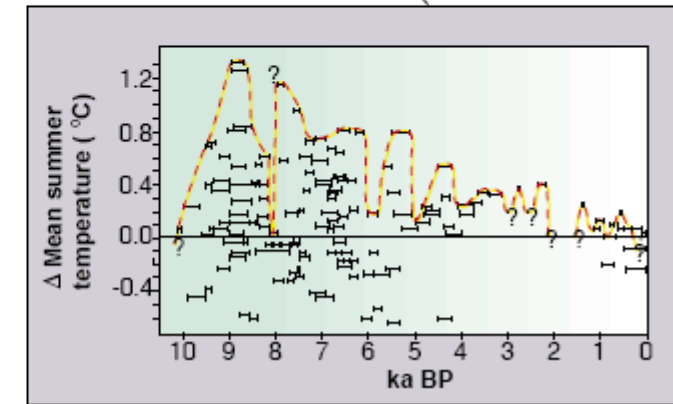
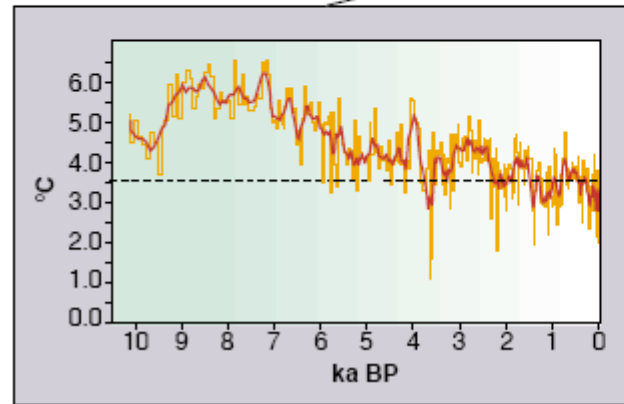
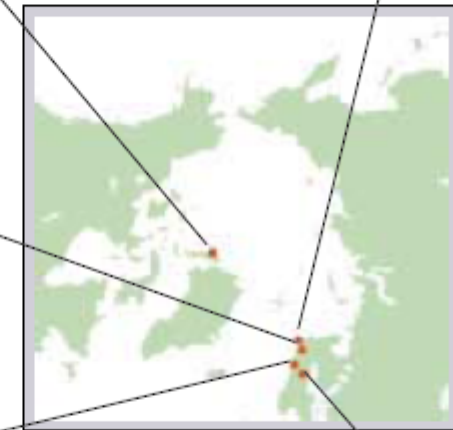
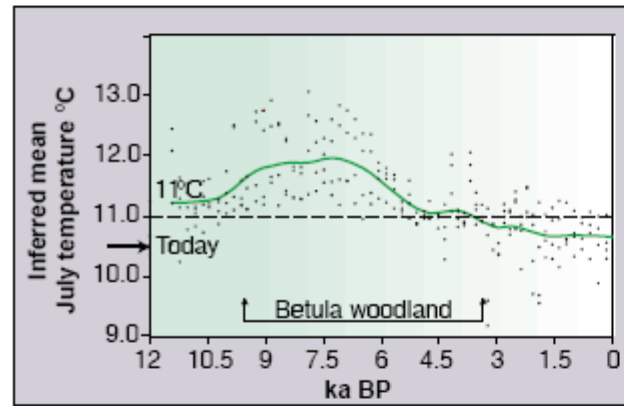
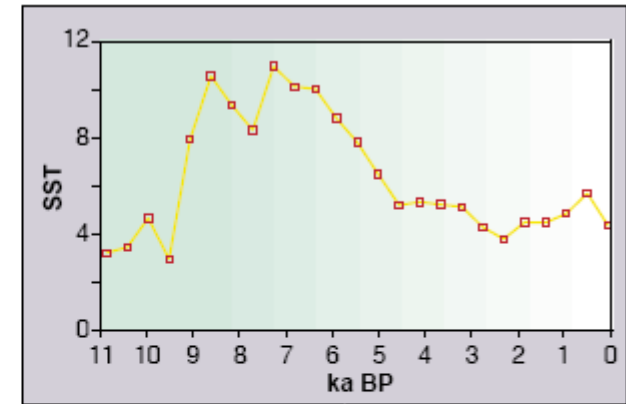
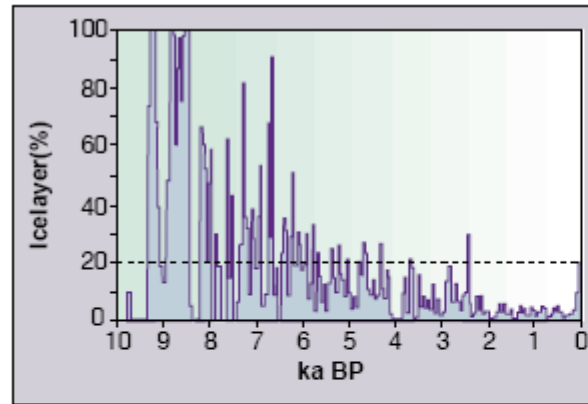
Historia koncentracji  $^{18}\text{O}$  z Jeziora Ammersee (południowe Niemcy) i rdzenia lodowego GRIP (Grenlandia) od końca epoki lodowej. Czy naprawdę przez ostatnich 10 tysięcy lat nic się nie działo (prócz zdarzenia 8200 lat temu)?

# Klimat holocenu jednak nie był taki niezmienny

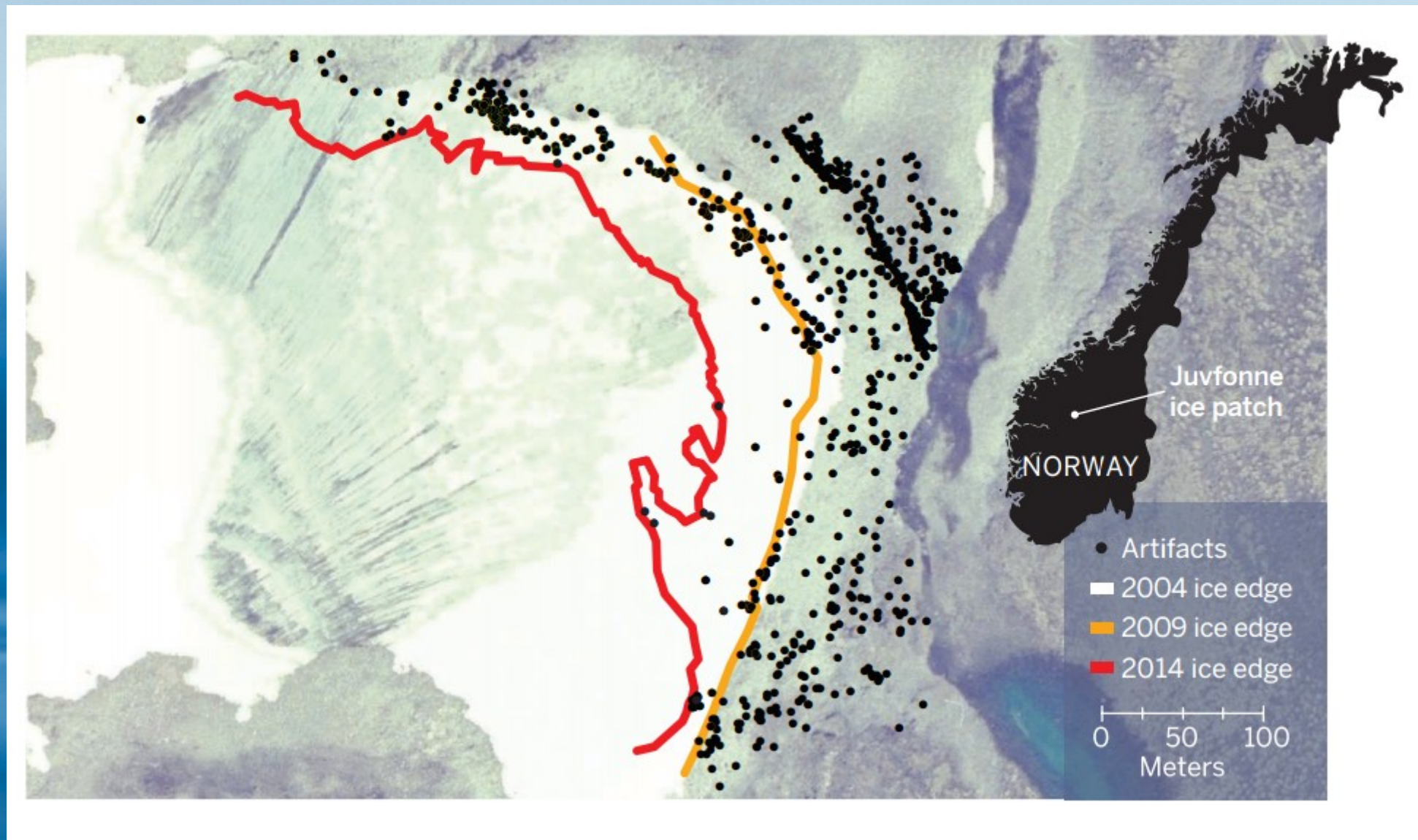
Od góry:

- ilość wody wytapianej z lodowców Agassiz,
- temperatura wody morskiej (okrzemki),
- temperatura lipca (pyłki roślin lądowych),
- temperatura letnia (izotopy tlenu),
- temperatura letnia (górna granica występowania sosny).

Zapis paleoklimatyczny holocenu, szczególnie półkuli północnej, pokazuje że klimat nie był niezmienny: przez większość ostatnich 10k lat następowało stopniowe ochłodzenie.



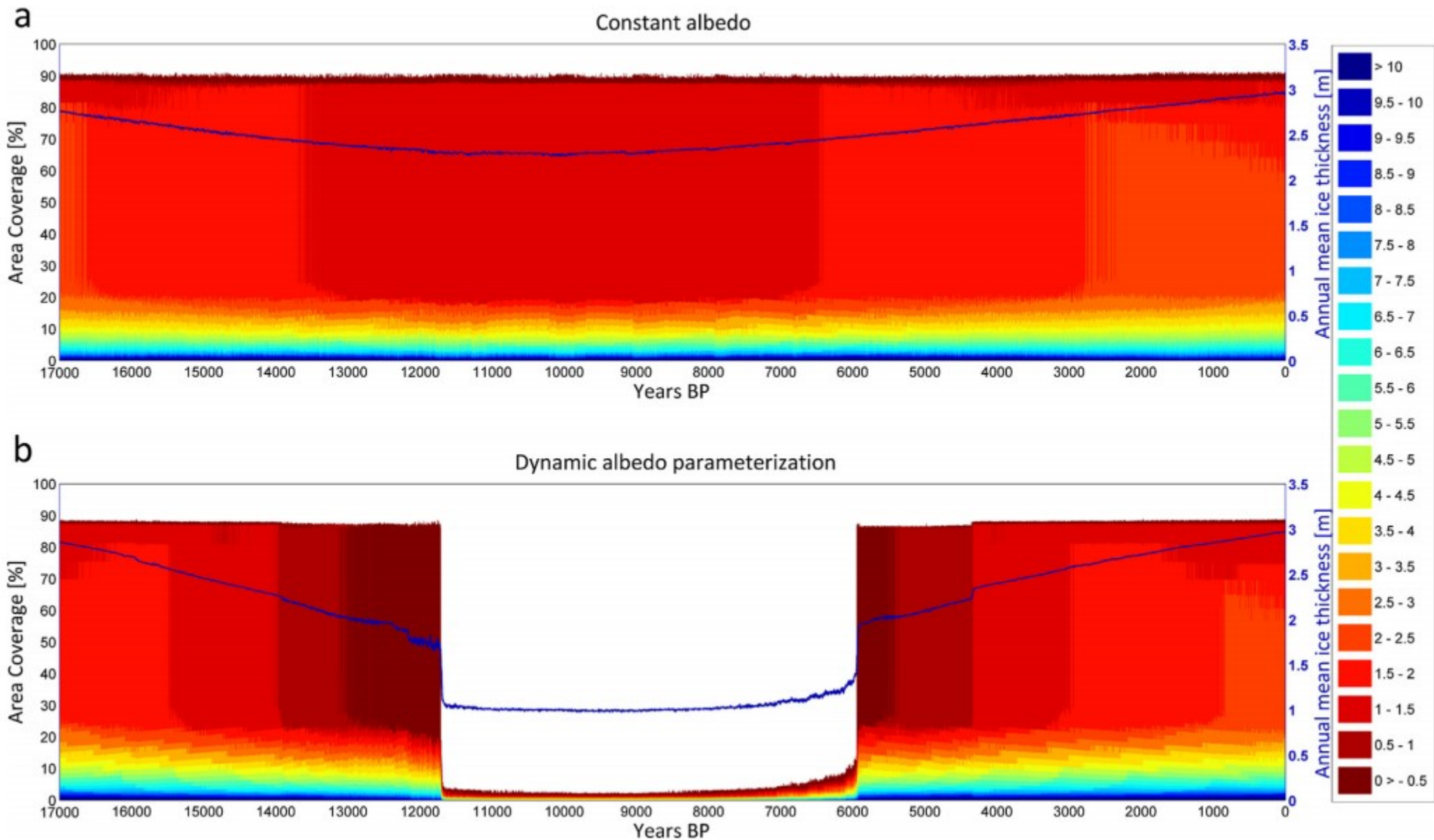
Kiedy ostatnio latem było w Norwegii tak ciepło jak w 2014 r.?



W ostatnich latach w Norwegii z pól wiecznego śniegu (nie lodowców!) wytapiały się znaleziska archeologiczne nawet o wieku 6000 lat, z optimum klimatycznego holocenu.

*Curry 2014 (Science)*

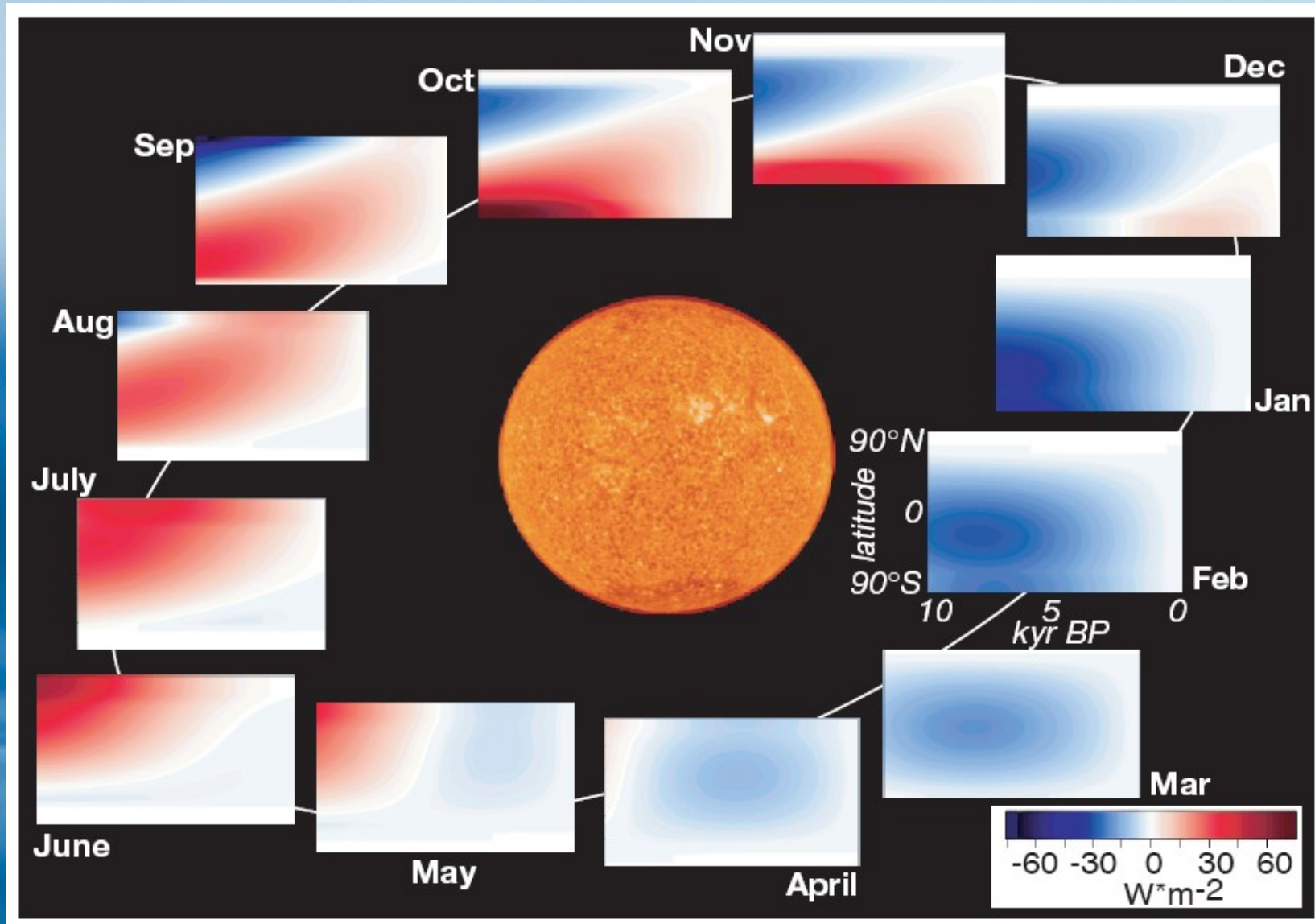
# Kiedy latem ostatnio Arktyka była wolna od lodu?



Według modelu uwzględniającego zmiany albedo jako sprzężenie zwrotne Arktyka był wolna od lodu morskiego latem ostatnio 6ka.

*Stranne, Jakobsson & Bjork 2014 (Quaternary Sci. Rev.)*

# Przyczyna: nasłonecznienie Ziemi w czasie holocenu



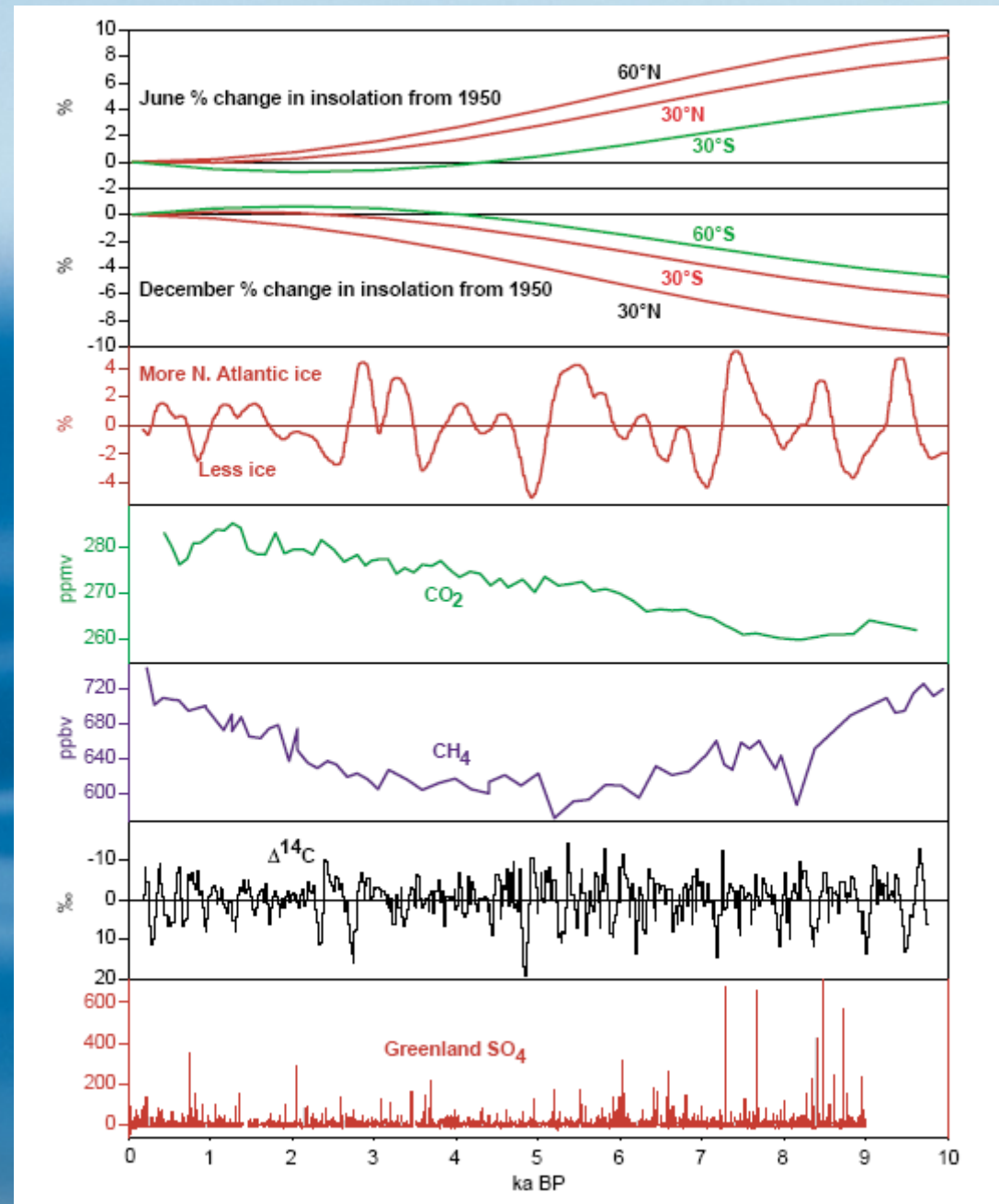
Każdy z paneli pokazuje nasłonecznienie w funkcji czasu (w poziomie od 10 ka do dziś) i w szerokości geograficznej. Zwraca uwagę zmniejszanie się od kilku tysięcy lat letniego nasłonecznienia półkuli północnej.

*Alvarez et al. 2002*

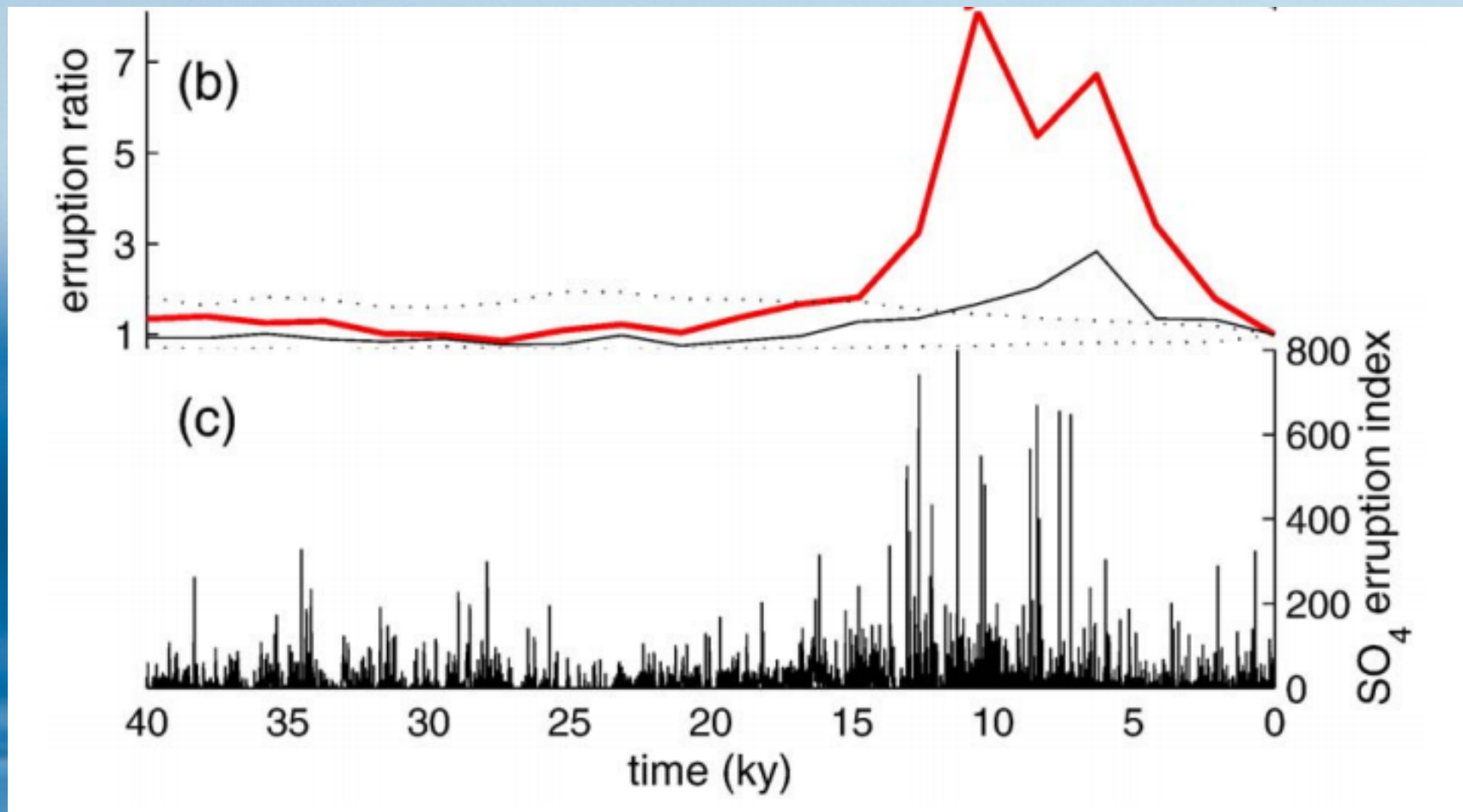
# Więcej parametrów klimatycznych holocenu

Od góry:

- *Nasłonecznienie w czerwcu i grudniu dla wybranych szerokości*
- *Stopień zimowego zalodzenia Atlantyku (osady denne)*
- *Atmosferyczna koncentracja CO<sub>2</sub> (rdzeń lodowy GRIP)*
- *Atmosferyczna koncentracja metanu (rdzeń lodowy GRIP)*
- *Anomalie koncentracji <sup>14</sup>C (skala odwrócona – zgodna z aktywnością słoneczną)*
- *Siarczany wulkaniczne (rdzeń lodowy GRIP)*



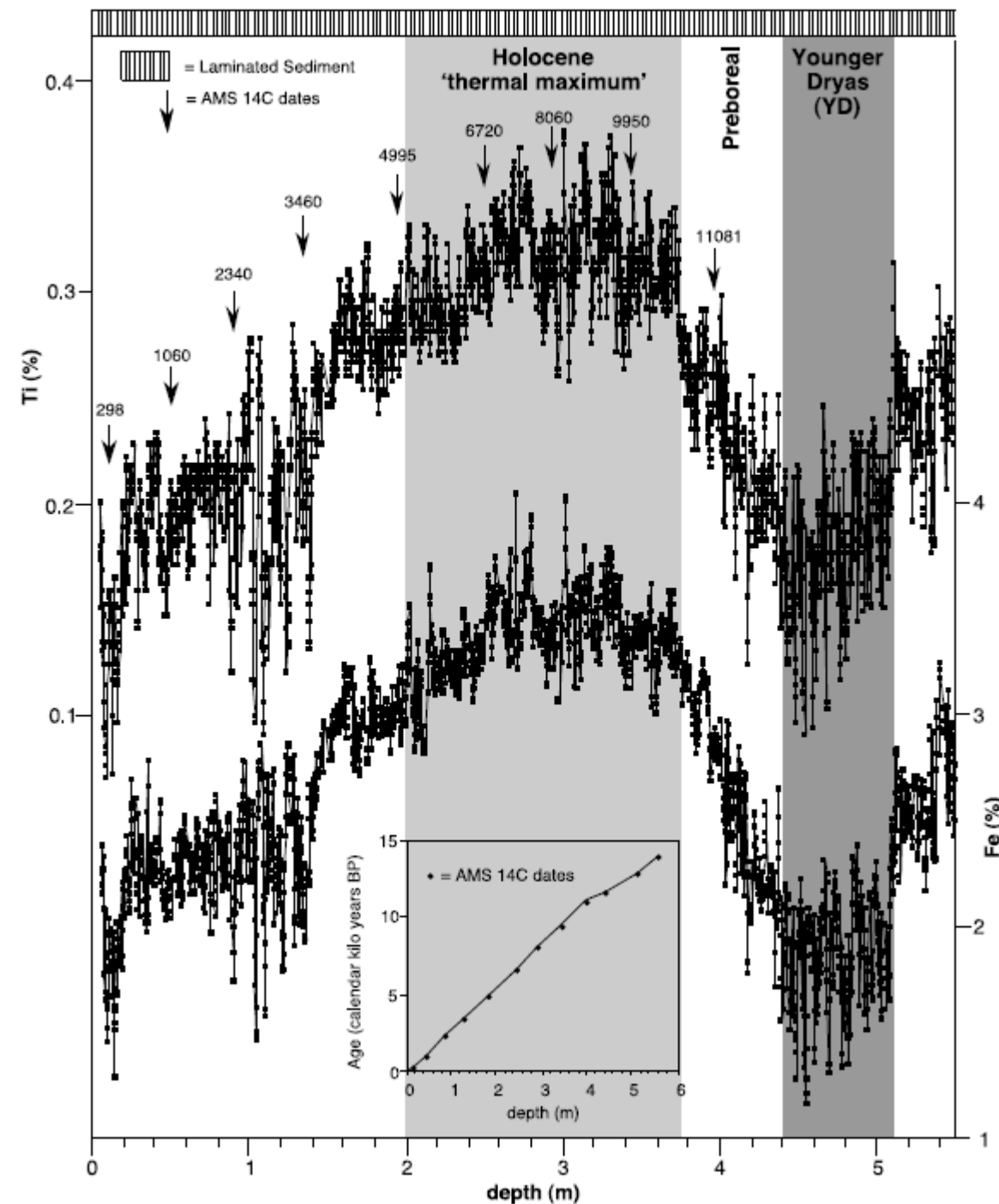
# Deglacjacja wpływa na wulkanizm?



Częstotliwość erupcji wulkanicznych zliczona dla wulkanów pokrytych lodowcem w epoce lodowej oraz na podstawie stężenia SO<sub>4</sub> w rdzeniach lodowych z Grenlandii świadczy o zwiększeniu ich częstości w czasie deglacjacji, prawdopodobnie w wyniku zmniejszenia ciśnienia w zbiornikach magmy. Może to powtórzyć się w przyszłości w wyniku topienia lądolodów.

*Huybers and Langmuir 2009 (Earth and Planetary Science Letters)*

# Zmiany klimatu także w tropikach



Zawartość metali (tytan i żelazo) w osadach Basenu Cariaco (w pobliżu Wenezueli) – proporcjonalnej do ilości osadów niesionych przez rzeki (czyli opadów). Maksimum opadów Wenezueli występowało w optimum klimatycznym holocenu (7-9 ka).

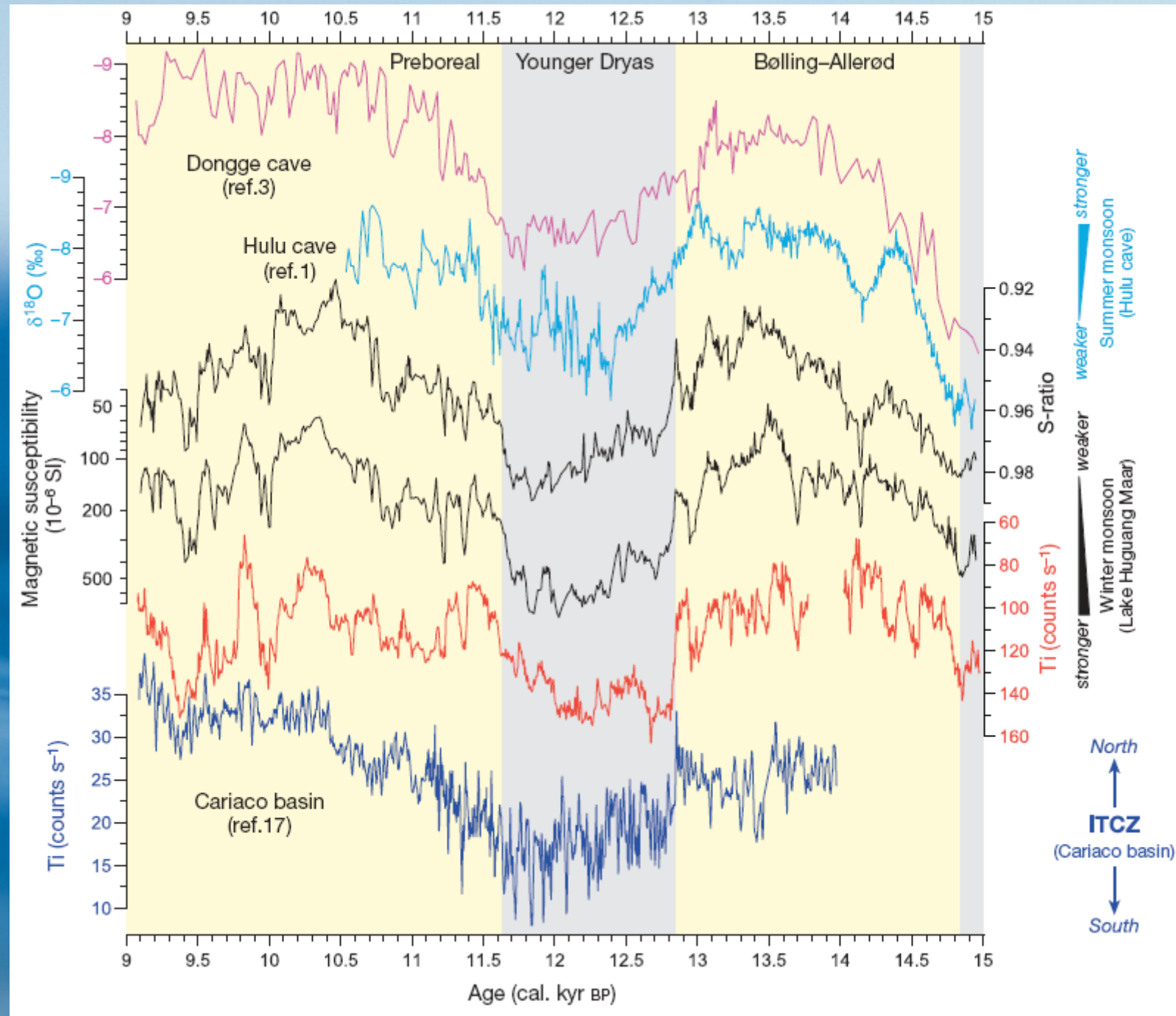
*Haugh et al. 2001 (Science)*

# Zmienność monsunu Azji i opadów nad Morzem Karaibskim

Zmiany w tropikach półkuli północnej występowały synchronicznie.

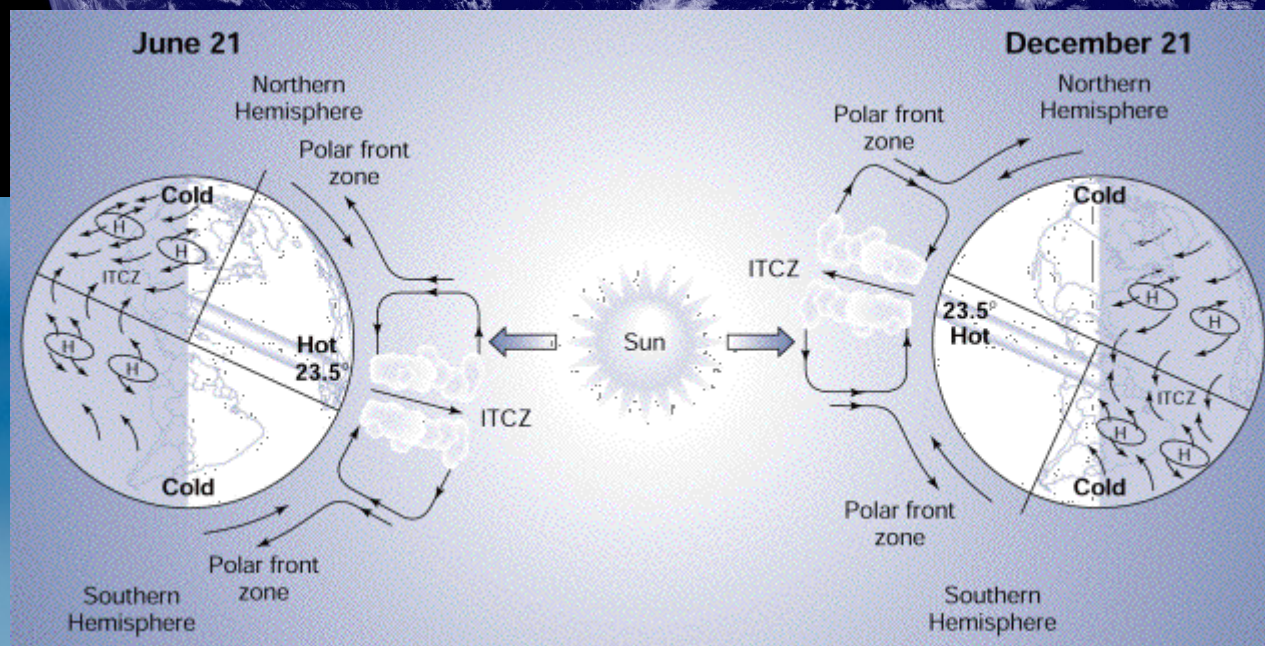
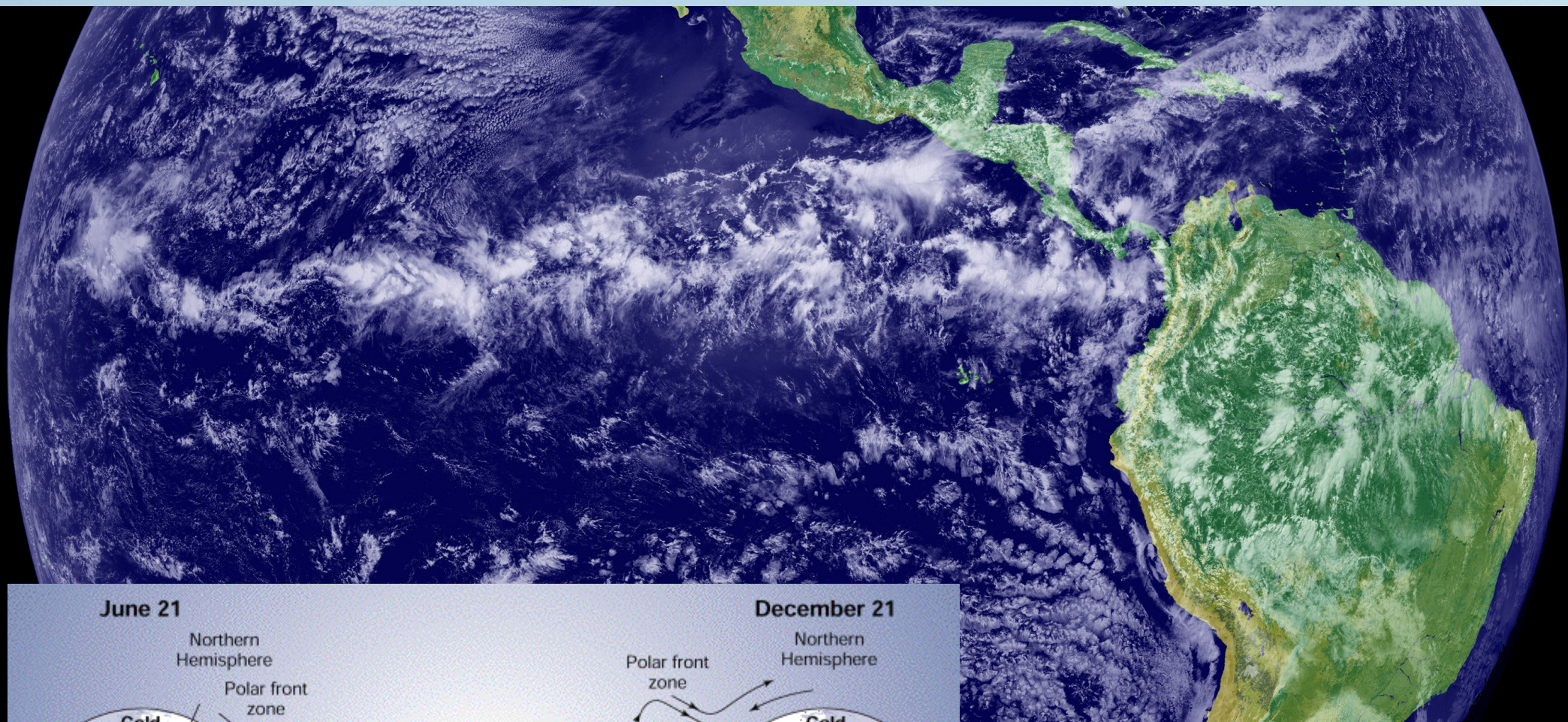
Wspólny mianownik?

Przesunięcie się na północ Tropikalnej Strefy Konwergencji na północ w czasie optimum klimatycznego.



*Yancheva et al. 2007 (Nature)*

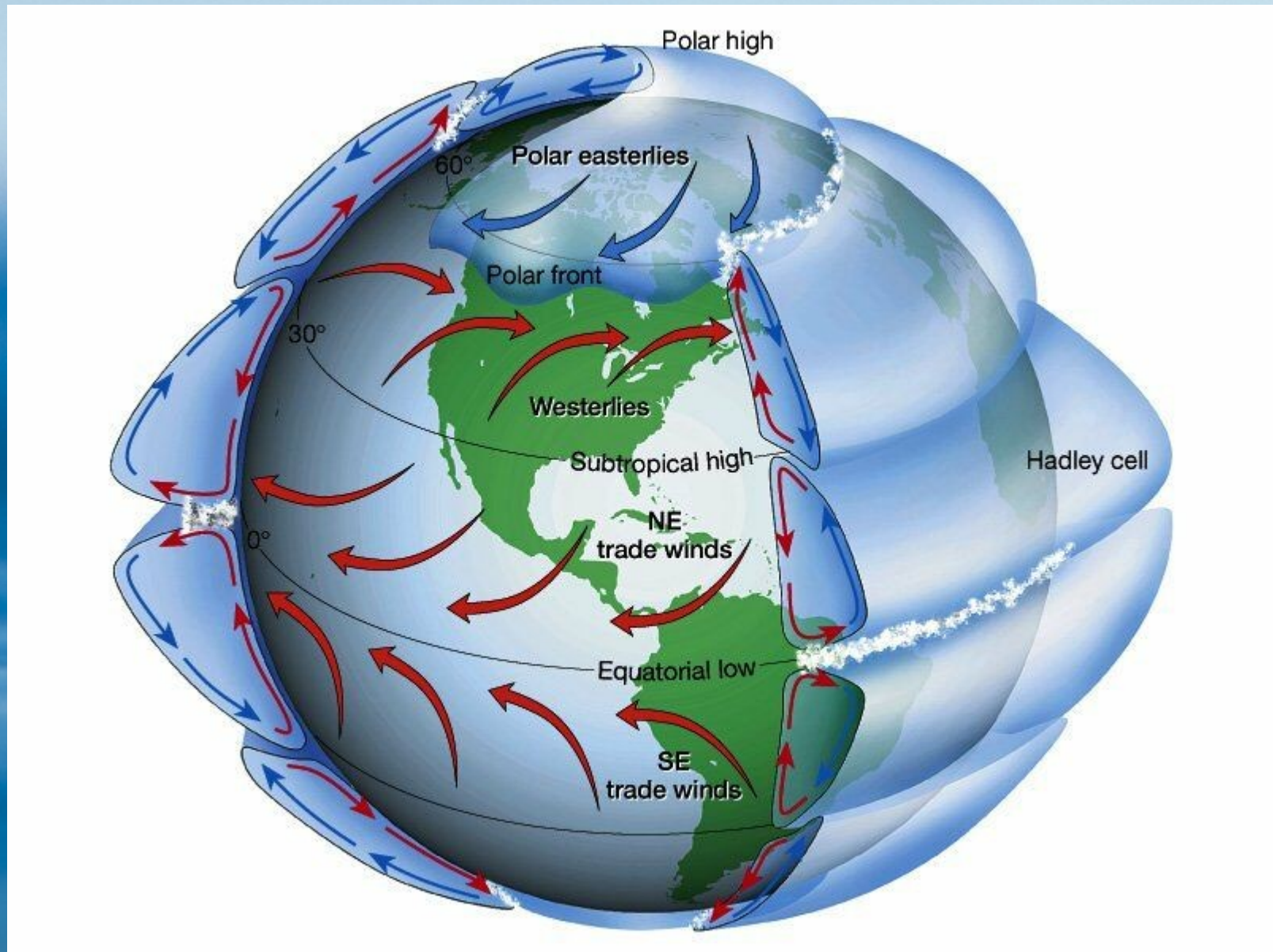
# Tropikalna Strefa Konwergencji



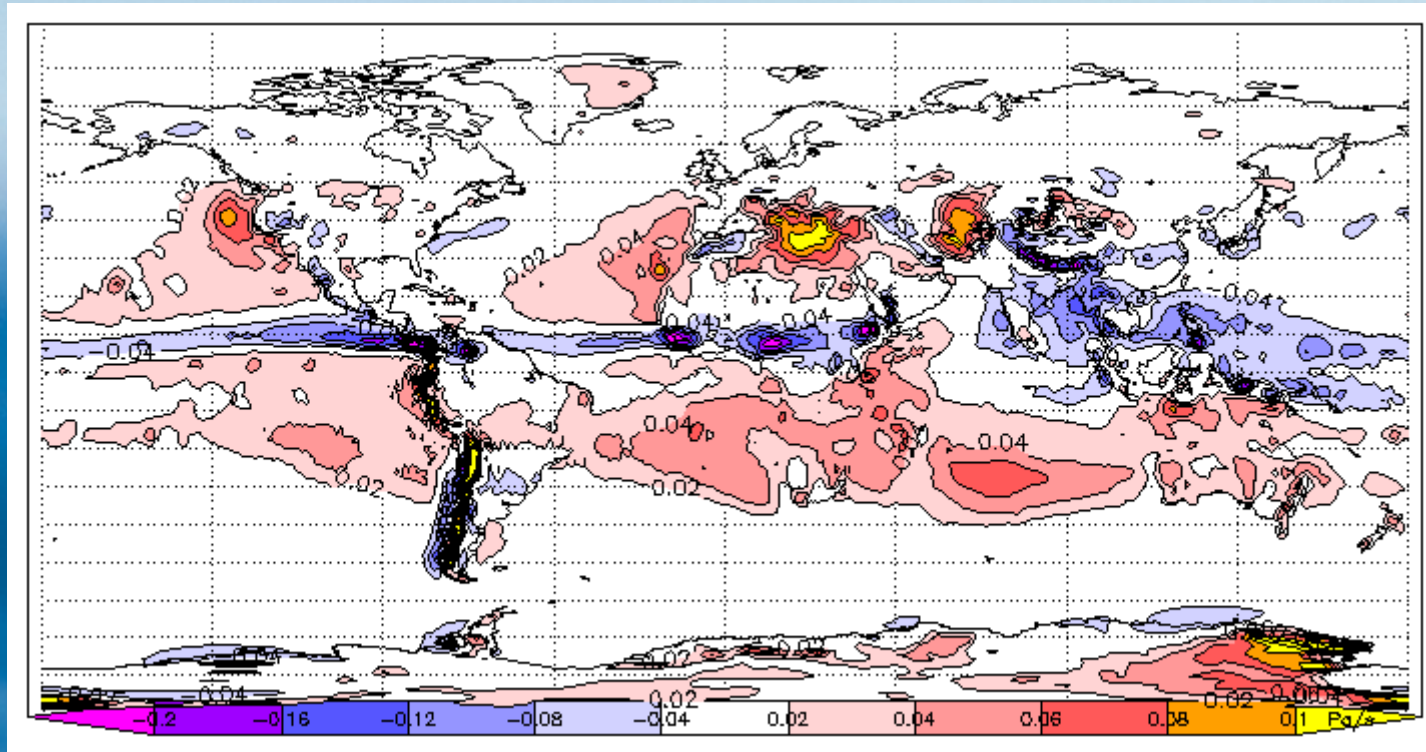
W ciągu roku ITCZ przesuwa się w kierunku bardziej nasłonecznionej półkuli (co widać – chociaż słabo - na dolnym rysunku)

*Kump et al. 2004*

# Trochę meteorologii: cyrkulacja atmosfery Ziemi



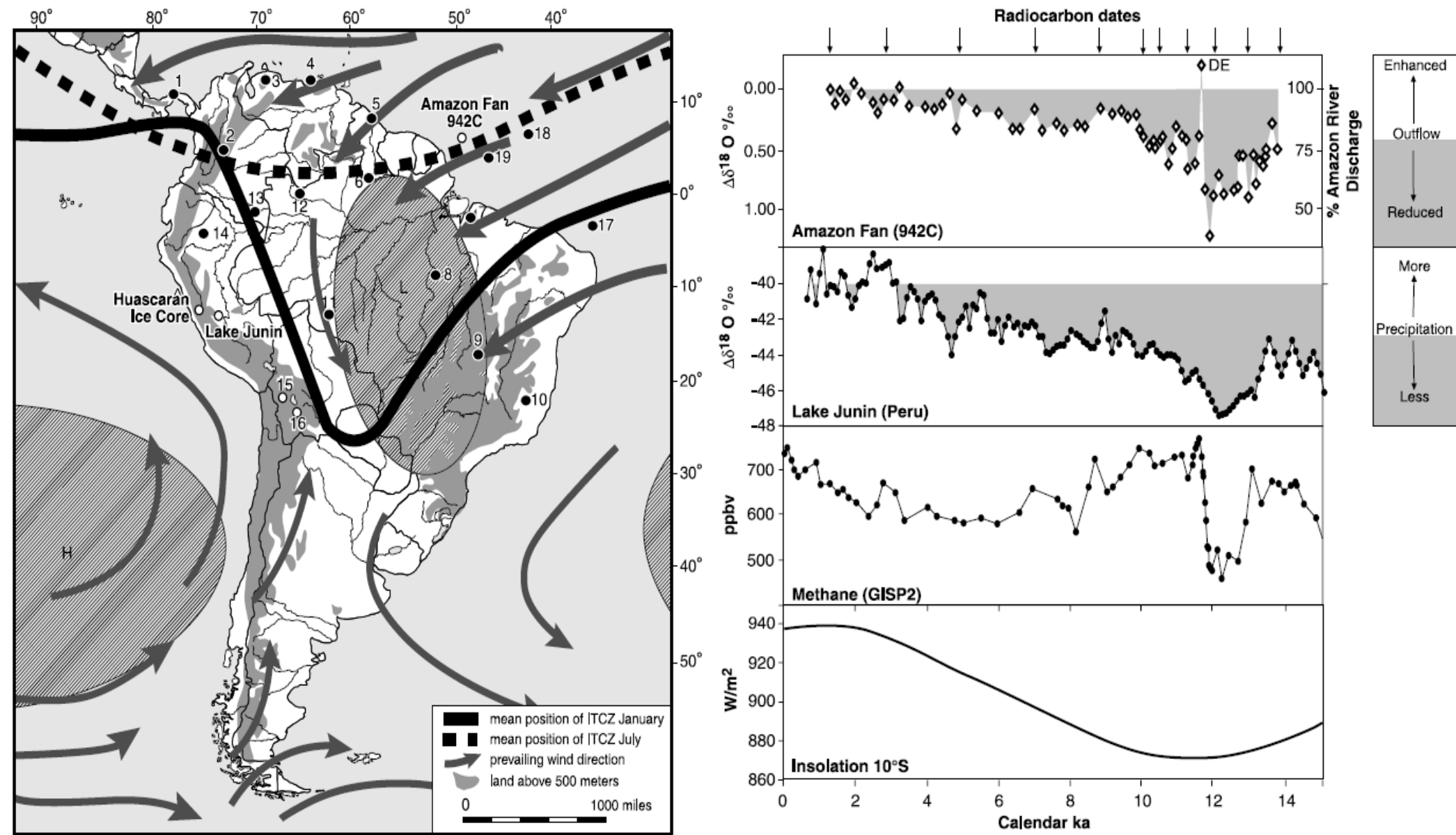
# Tropikalna Strefa Konwergencji (ITCZ) dziś



*Średnie ruchy pionowe dolnych warstw atmosfery w lipcu.*

W czasie holocenińskiego optimum klimatycznego ITCZ przesunięta była bardziej na północ powodując (m.in.) większe deszcze w rejonie Morza Karaibskiego, silniejsze deszcze monsunowe w Azji oraz w rejonie Sahary oraz bardziej uchy klimat np. w Brazylii czy Pn. Australii.

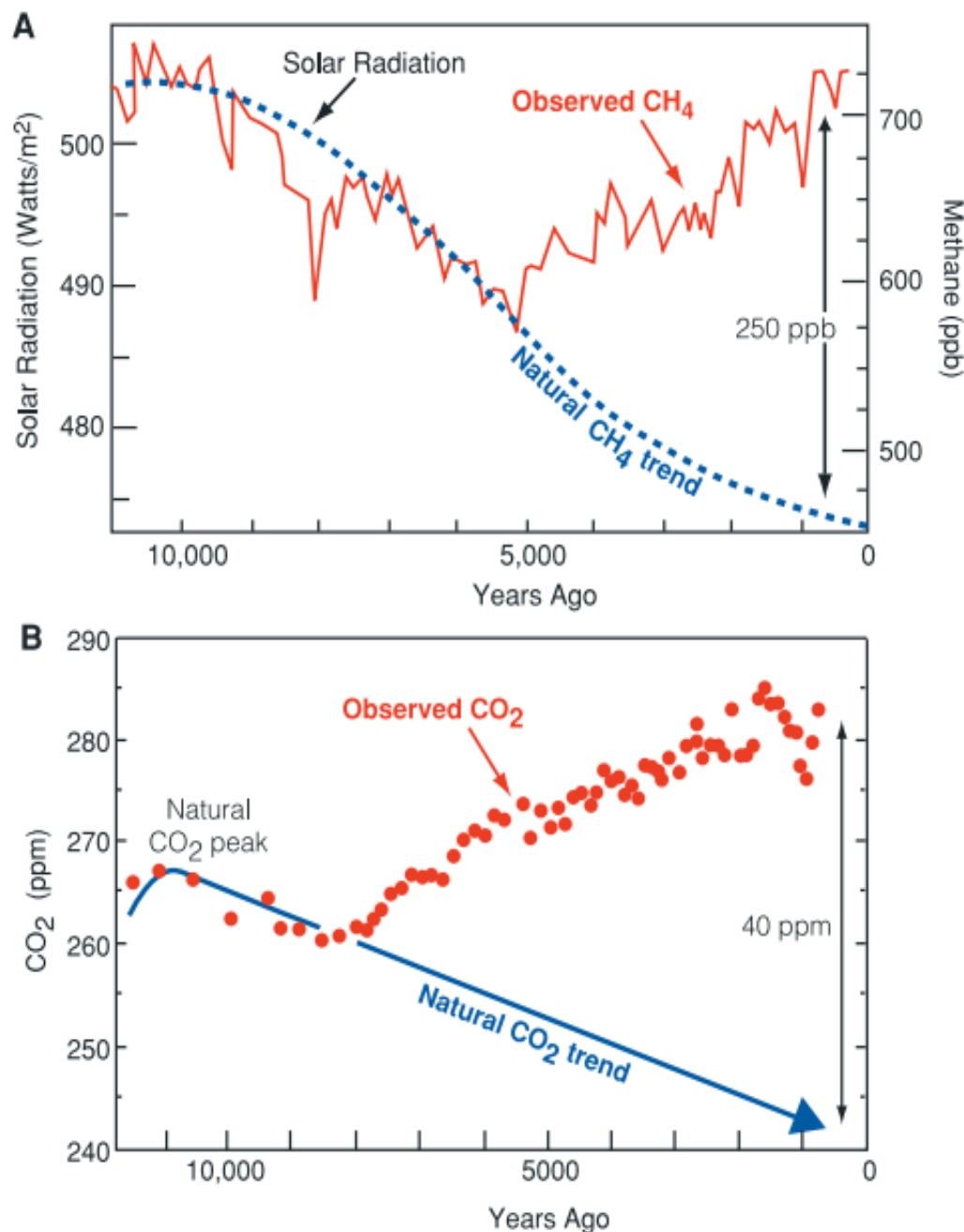
# Amazonia i Peru były suchsze w optimum klimatycznym



Przesunięcie się Tropikalnej Strefy Konwergencji na północ pozbawiło pory deszczowej duże obszary Amazonii i Andów

*Maslin & Burns 2000 (Science)*

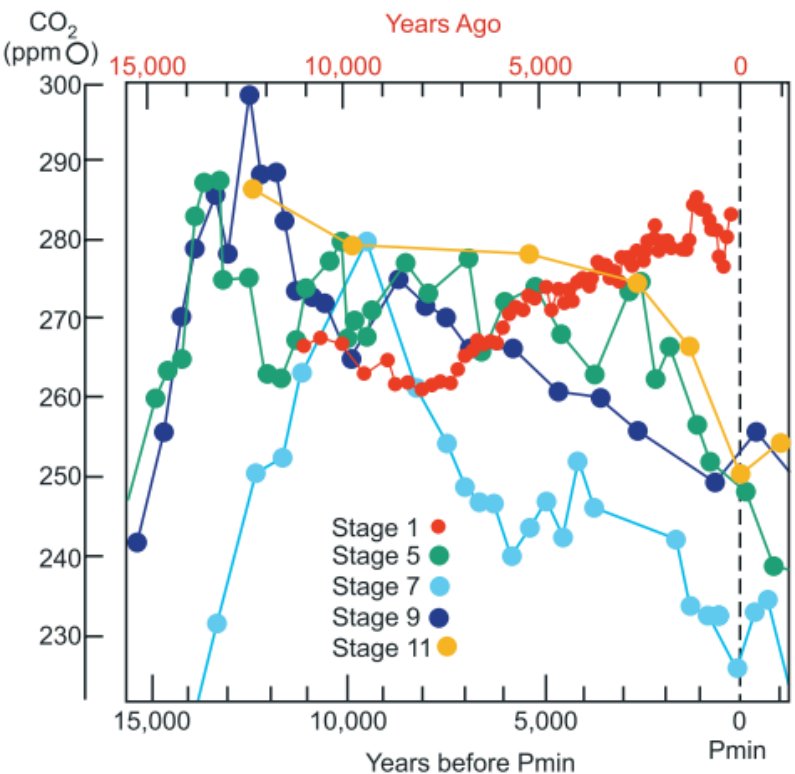
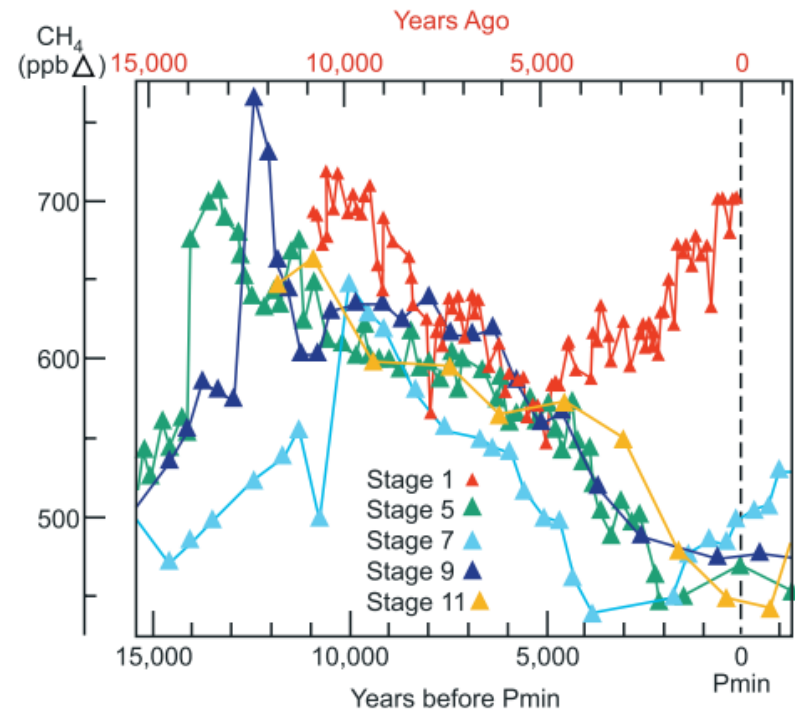
# CO<sub>2</sub> i metan: od kiedy ogrzewamy Ziemię?



Dwutlenek węgla i metan przestały korelować z długofalowymi cyklami nasłonecznienia (Milankovitch, 1941) odpowiednio 8 i 5 tys. lat temu. Odpowiada to początkom rolnictwa odpowiednio w Europie (wycinanie lasów) i w Chinach (pola ryżowe).

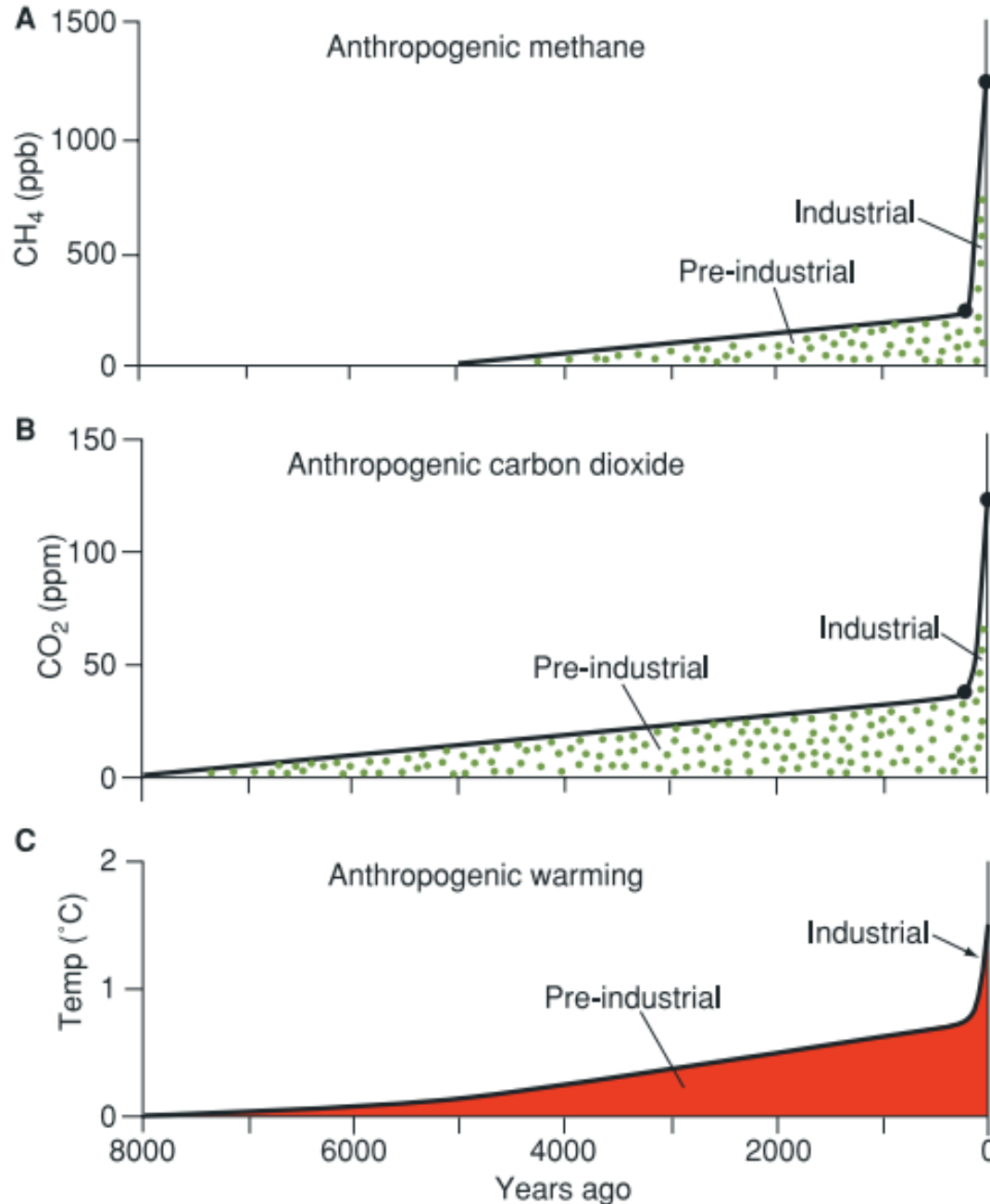
*Koncentracja CO<sub>2</sub> oraz metanu z rdzeni lodowych ze stacji Wostok na Antarktydzie (ostatnie 12 tysięcy lat)*

# Dlaczego obecny interglacjał jest nietypowy?



Porównanie zmian koncentracji metanu (na górze) i CO<sub>2</sub> (na dole) w czasie ostatnich pięciu interglacjałów. Jedynie w holocenie obserwuje się wzrost koncentracji tych gazów.

# Jak to możliwe?



W epoce przemysłowej przez 200 lat człowiek uwolni do atmosfery ok. 160 Gt węgla z kopalin, po średnio 0.8 Gt rocznie.

W ciągu wcześniejszych 7800 lat wycinane (a właściwie wypalanie) lasów (0.04 Gt rocznie) dało ok. 320 Gt, czyli dwukrotnie więcej.

Żółw wyprzedził zająca.

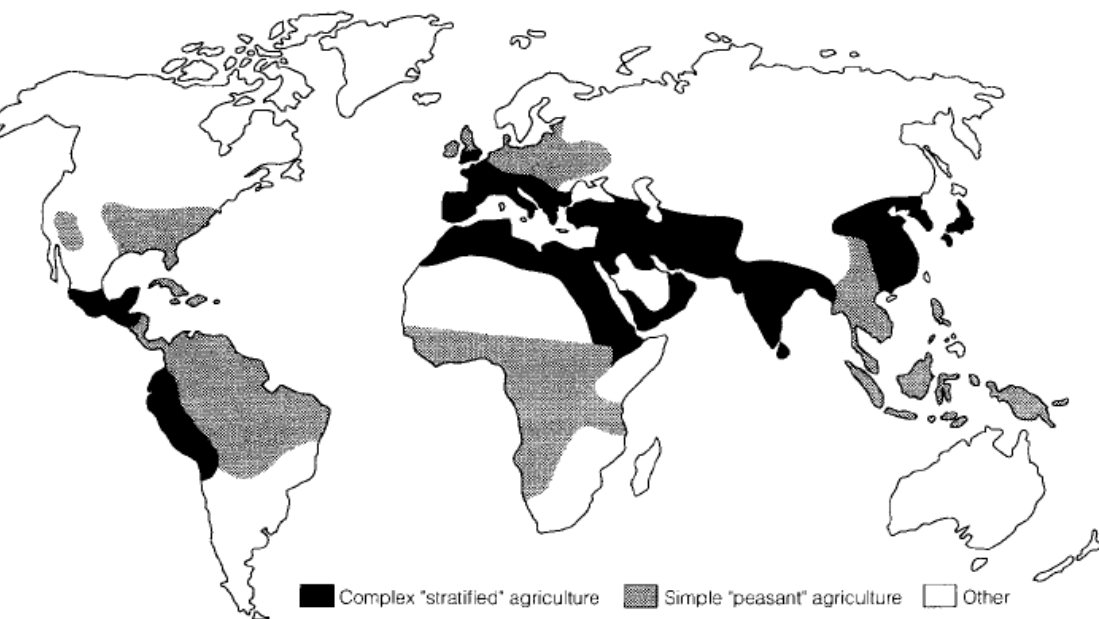
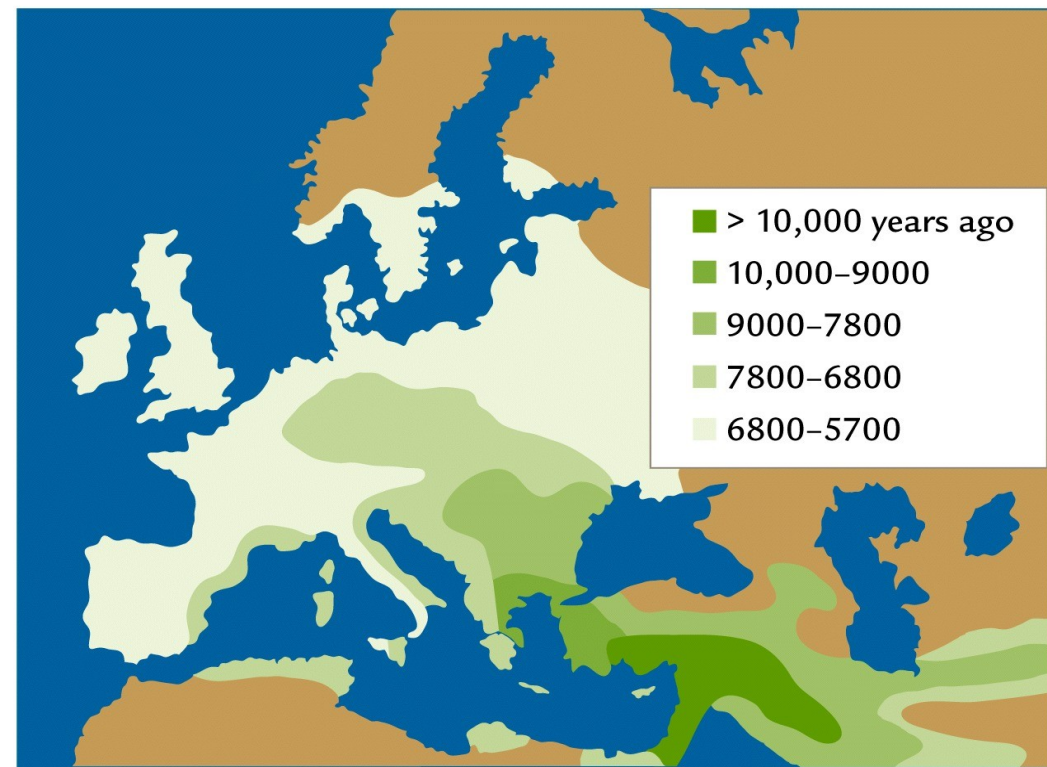
# Czy wypaliliśmy dość lasów?

*Rozprzestrzenianie się rolnictwa w Europie (skala w „latach temu”) oraz geografia rolnictwa 2000 lat temu (czarne obszary – rolnictwo intensywne, szare – rolnictwo „prymitywne”)*

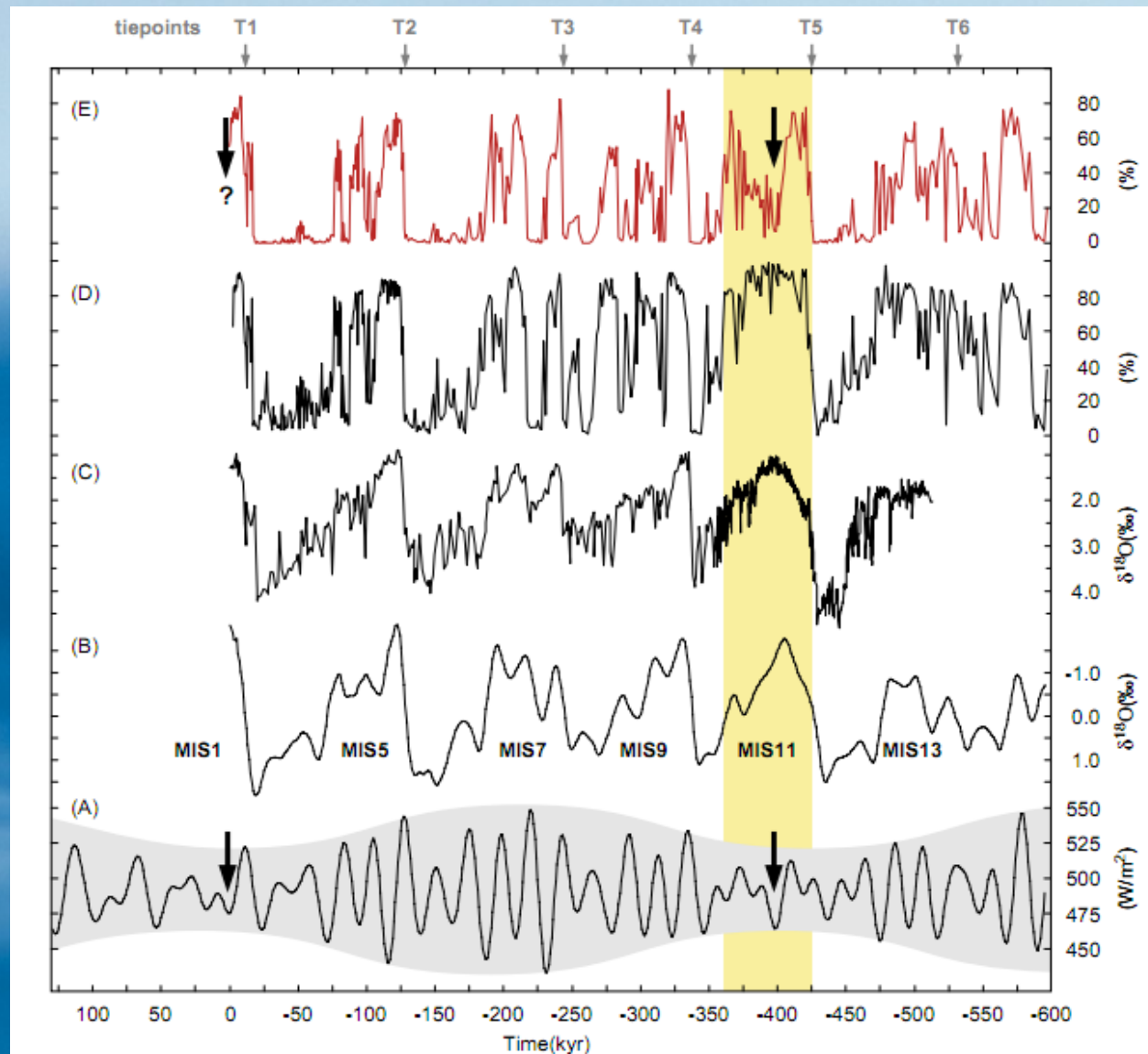
Rolnictwo wkroczyło w obszary leśne ok 8-9 ka, dokładnie wtedy gdy przestała spadać koncentracja CO<sub>2</sub>.

Bilans obszarów leśnych wyciętych przed rokiem 1 n.e (2000 lat temu) daje ok. 220-250 Gt węgla, ilość zgodną z “teorią żółwia”.

*Ruddiman 2003 (Climatic Change)*



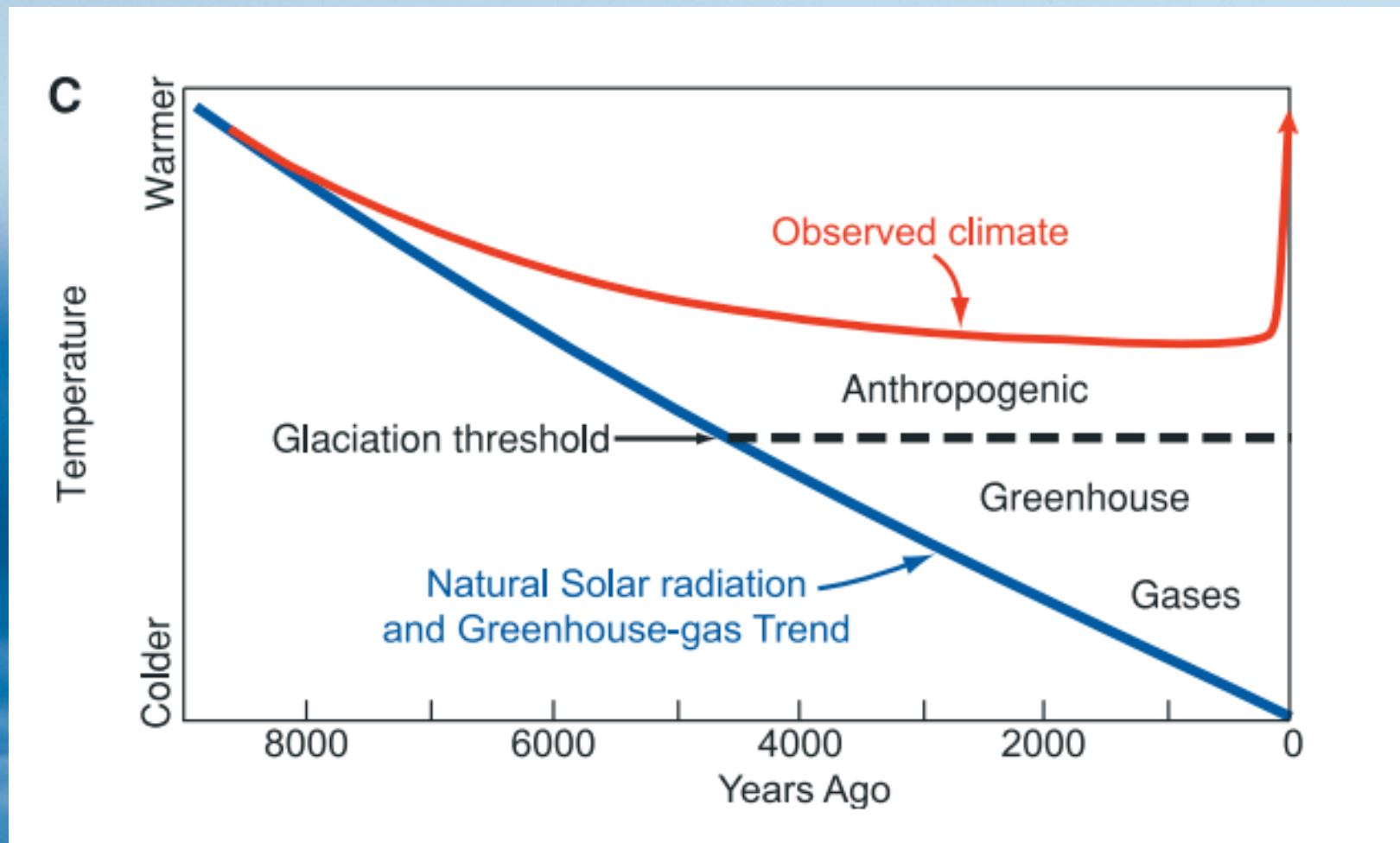
# Powstrzymaliśmy zlodowacenie? 1/2



Interglacja MIS 11 (*Marine Isotope Stage*) zakończył się przy bardzo podobnych do dzisiejszych parametrach orbitalnych. E to pyłki drzew ciepłolubnych z Grecji.

*Muller & Prost 2007 (Quaternary Science Reviews)*

# Powstrzymaliśmy zlodowacenie? 2/2



Porównanie obecnego interglacjału (holocenu) z poprzednimi pokazuje, że od 4-5 tys lat Ziemia powinna być w kolejnym zlodowaceniu. Wydaje się, że to działalność *Homo sapiens* powstrzymała początek nowej epoki lodowej.

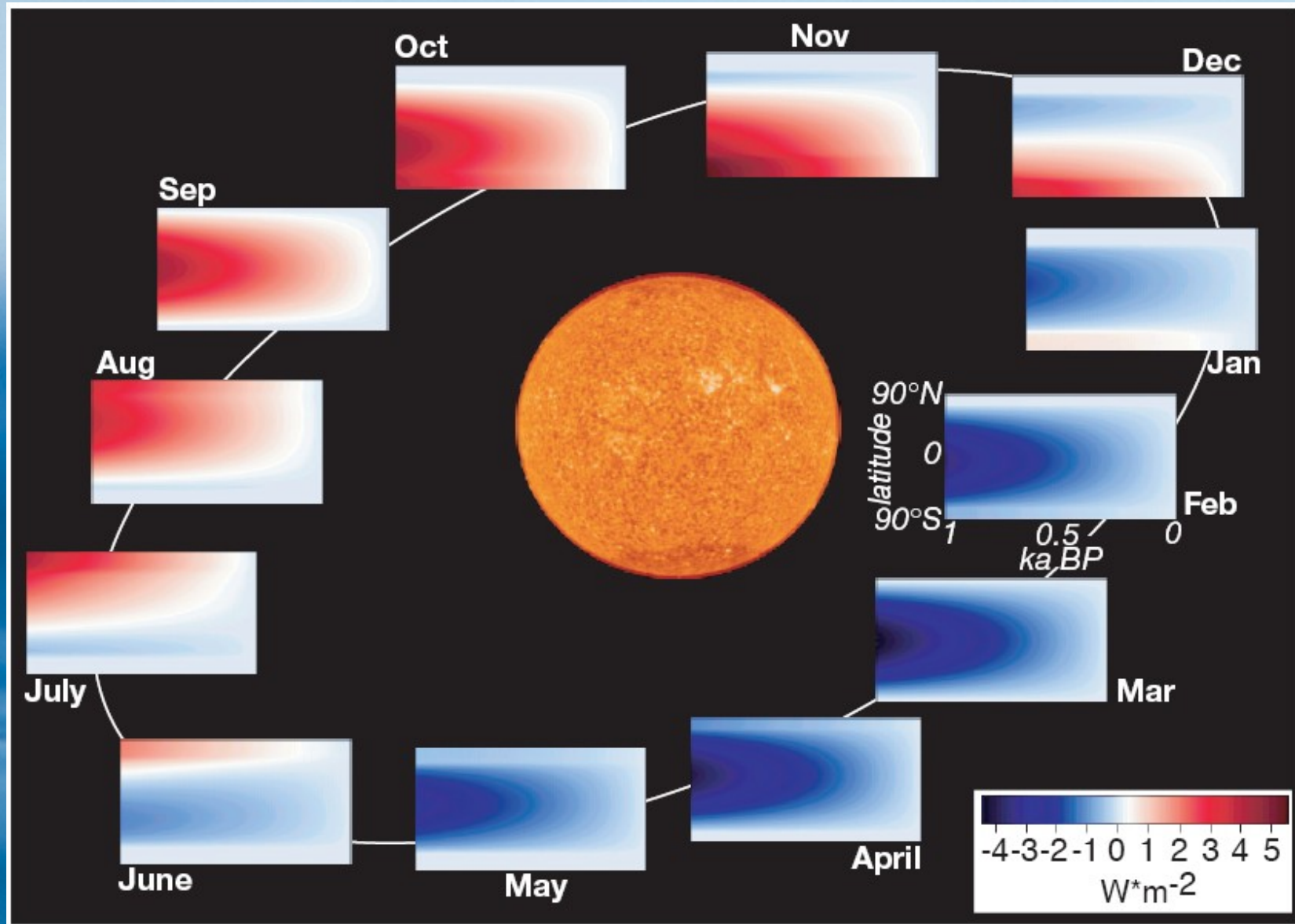
# Podsumowanie 1/3

- Panujące do niedawna przekonanie o stabilności klimatu w holocenie (10 ka) okazało się nieprawdziwe.
- Po optimum klimatycznym ok 8-9 ka, rozpoczęło się powolne oziębianie, szczególnie półkuli północnej, związane z coraz mniejszym oświetleniem słonecznym tej półkuli.
- Cieplesza półkula północna w optimum klimatycznym spowodowała przesunięcie się strefy opadów tropikalnych na północ.
- W przeciwieństwie do poprzednich interglacjalów, w holocenie nie następuje obniżanie się koncentracji CO<sub>2</sub> i metanu razem z oświetleniem półkuli północnej (od 8 ka dla CO<sub>2</sub> i 5 ka dla metanu).
- Istnieje hipoteza wiążąca ten trend z wczesnym rolnictwem. Oznaczałoby to, że sami uratowaliśmy się przed epoką lodową.



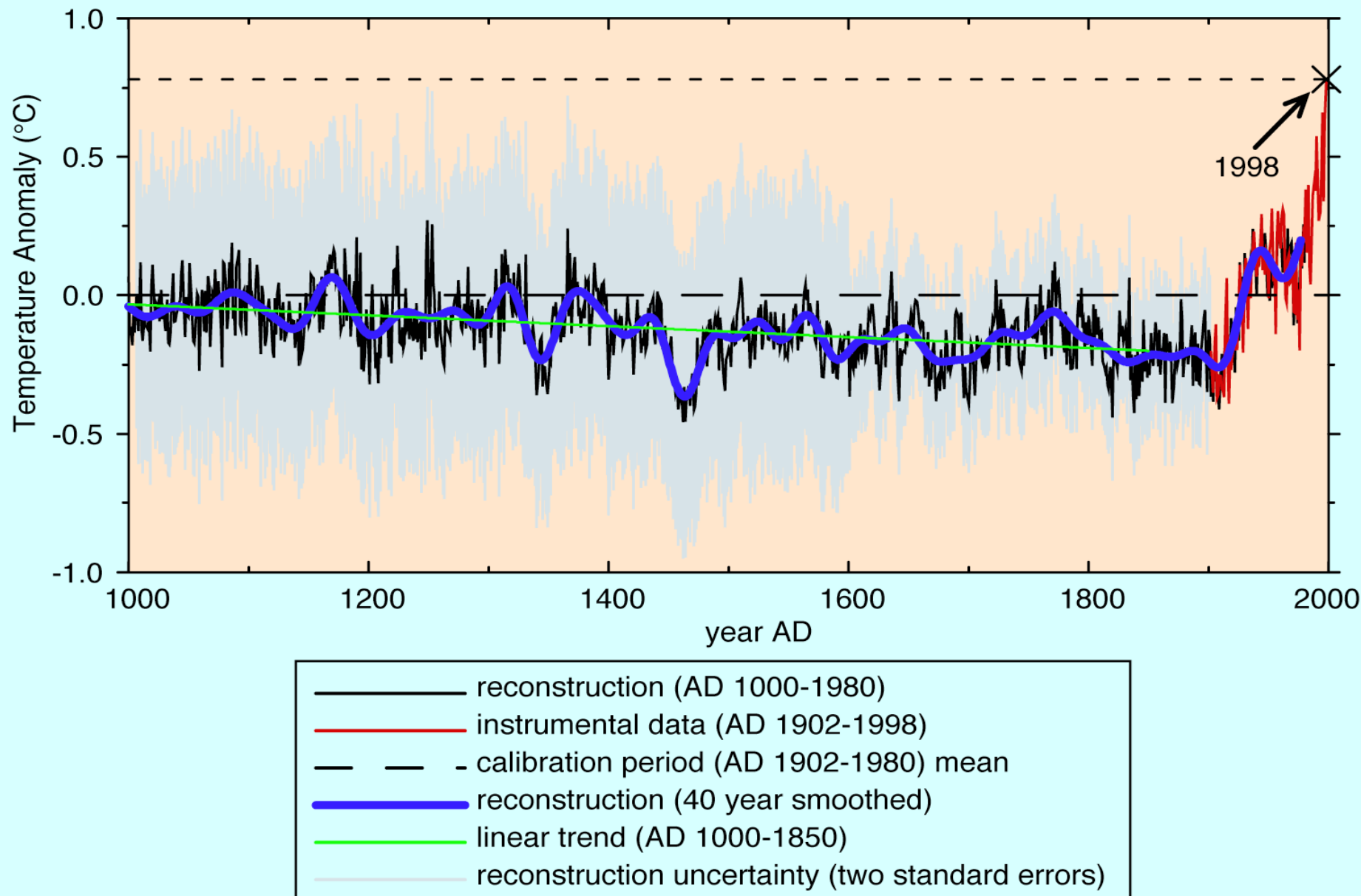
*Narzędzie wczesnych rolników z ok. 6000 lat p.n.e.: czy wystarczyły dla powstrzymania lodowców? (Encarta)*

# Nasłonecznienie Ziemi w czasie ostatniego milenium



Każdy z paneli pokazuje nasłonecznienie w funkcji czasu (w poziomie od 1 ka do dziś) i w szerokości geograficznej. Zwraca uwagę dalsze zmniejszanie się letniego nasłonecznienia półkuli północnej.

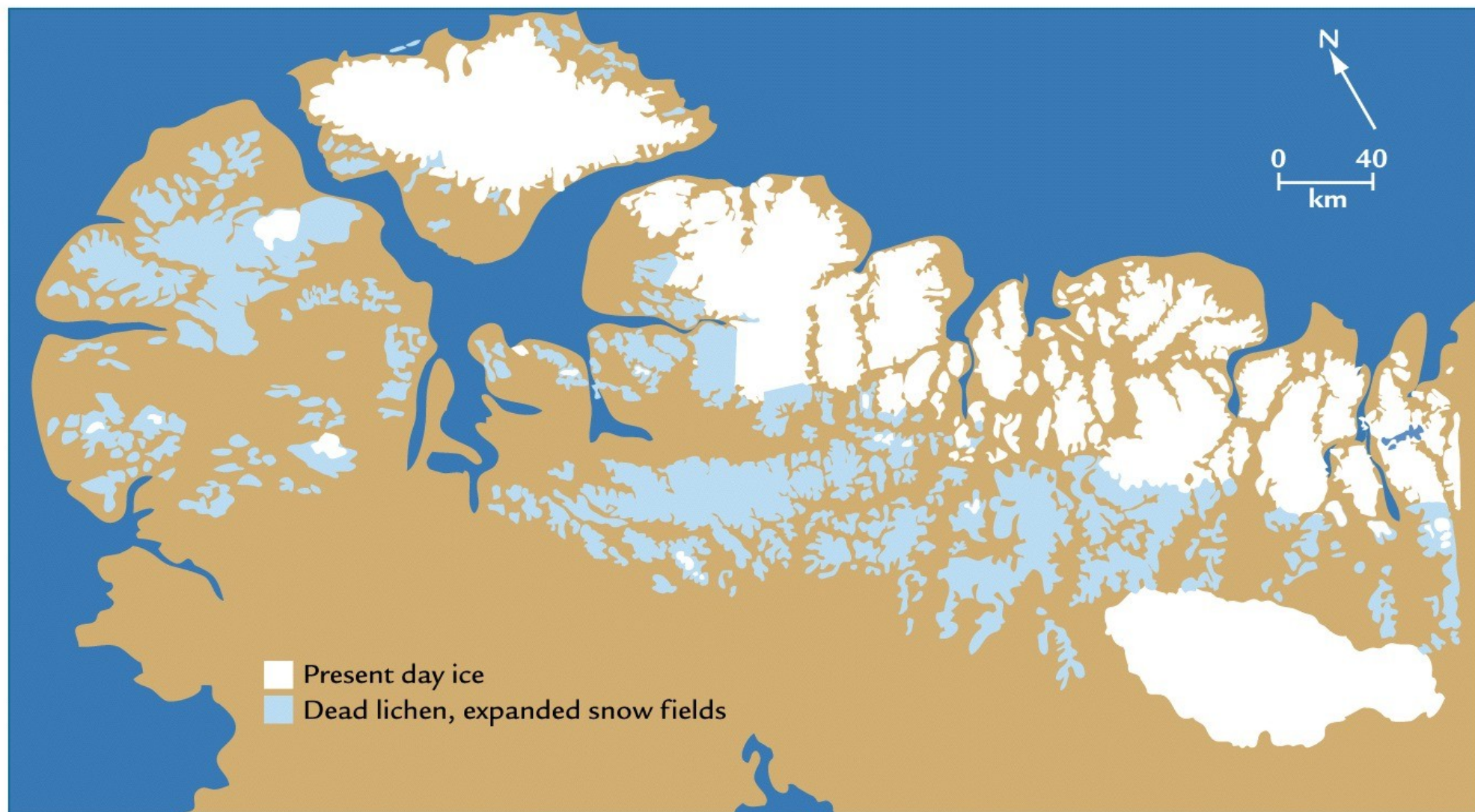
# „Kij hokejowy” (*hockey stick*) Manna



Zrekonstruowany trend temperatury dla półkuli północnej wykazuje trend zniżkowy aż do końca 18-go wieku (stan wiedzy na 1999 r) przy jedynie niewielkim maksimum w średniowieczu.

*Bradley 2003 za Mann et al. 1999*

# Mała Epoka Lodowa: byliśmy blisko prawdziwej

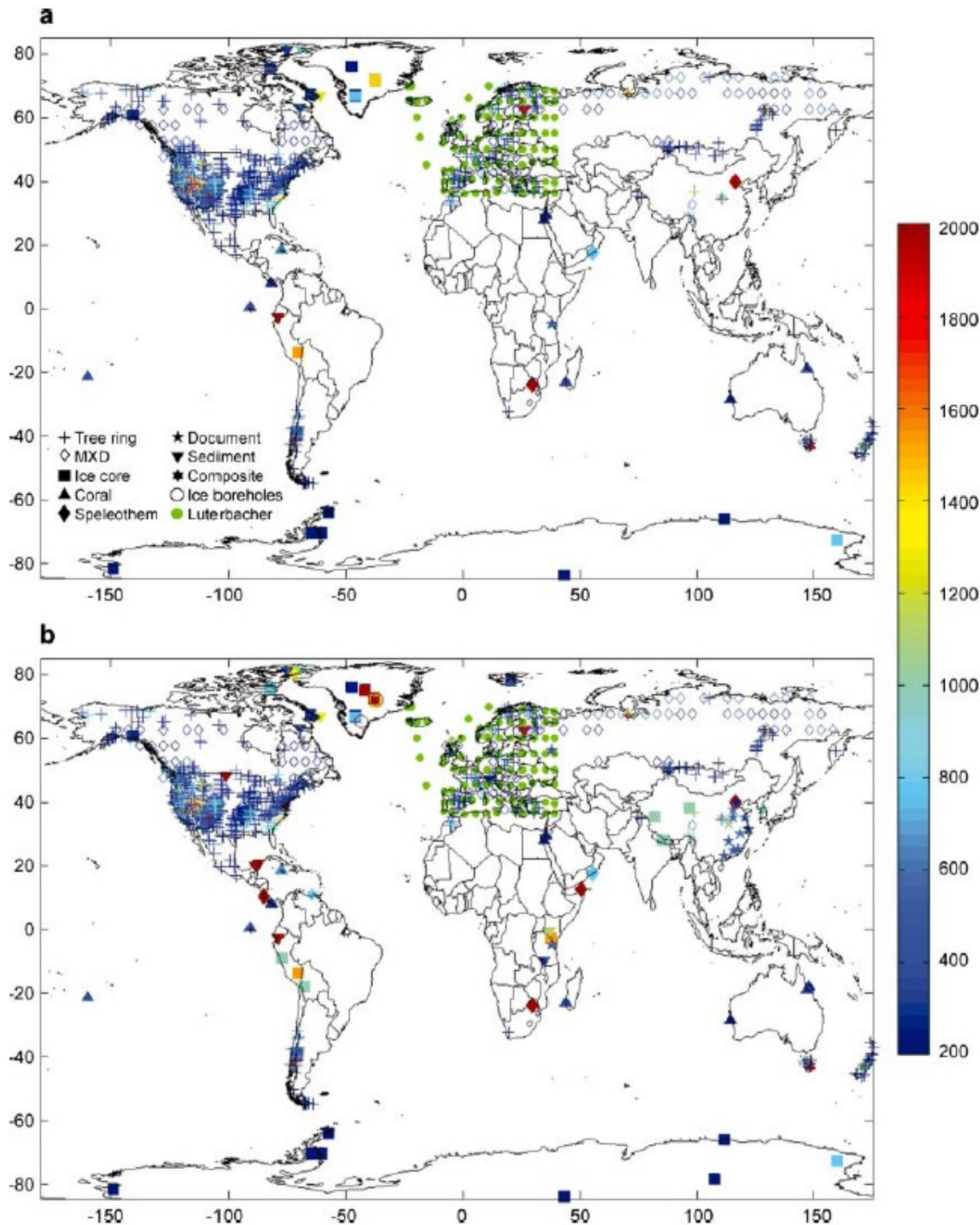


C

Martwe porosty na Wyspie Baffina świadczą o znacznym rozszerzeniu się pól lodowych Kanady – pierwszej fazy każdego zlodowacenia. Pola lodowe cofnęły się po roku 1900.

*Ruddiman 2000 za Andrews et al. 1976*

## Czego używał Mann?

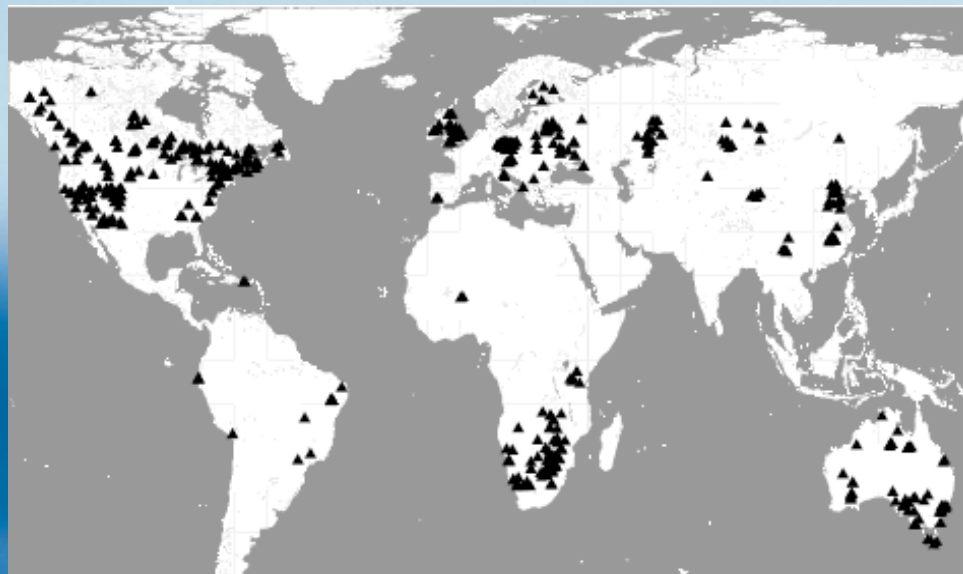
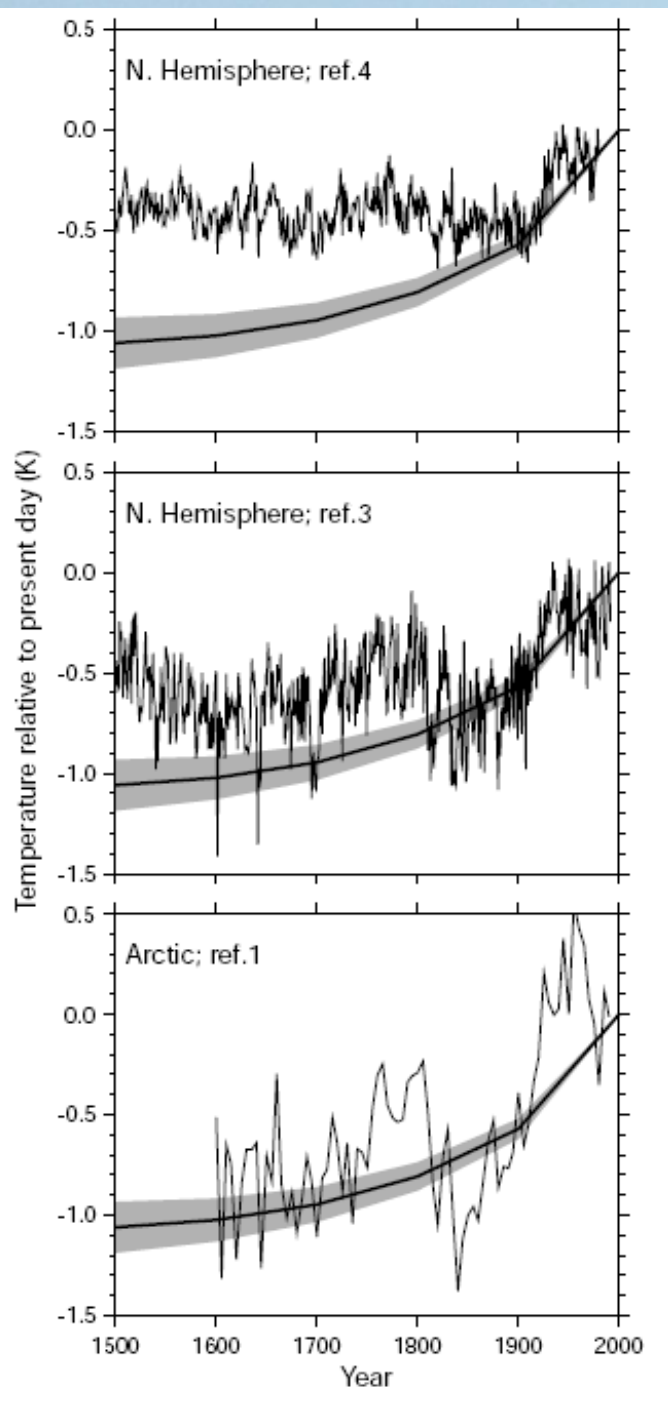


Zapisy o rozdzielczości jednorocznej (góra) i dowolnej (dół). Kolorem zaznaczono długość zapisu (czerwone najdłuższe). Wśród danych są słoje drzew (także "MXD"), rdzenie lodowe, korale, stalagmity, dane instrumentalne i historyczne (także „Luterbacher”), osady jeziorne, oraz temperatury z odwiertów (*boreholes*).

Widać przewagę zapisów półkuli północnej.

*Mann 2007 (preprint)*

# Temperatury z odwiertów



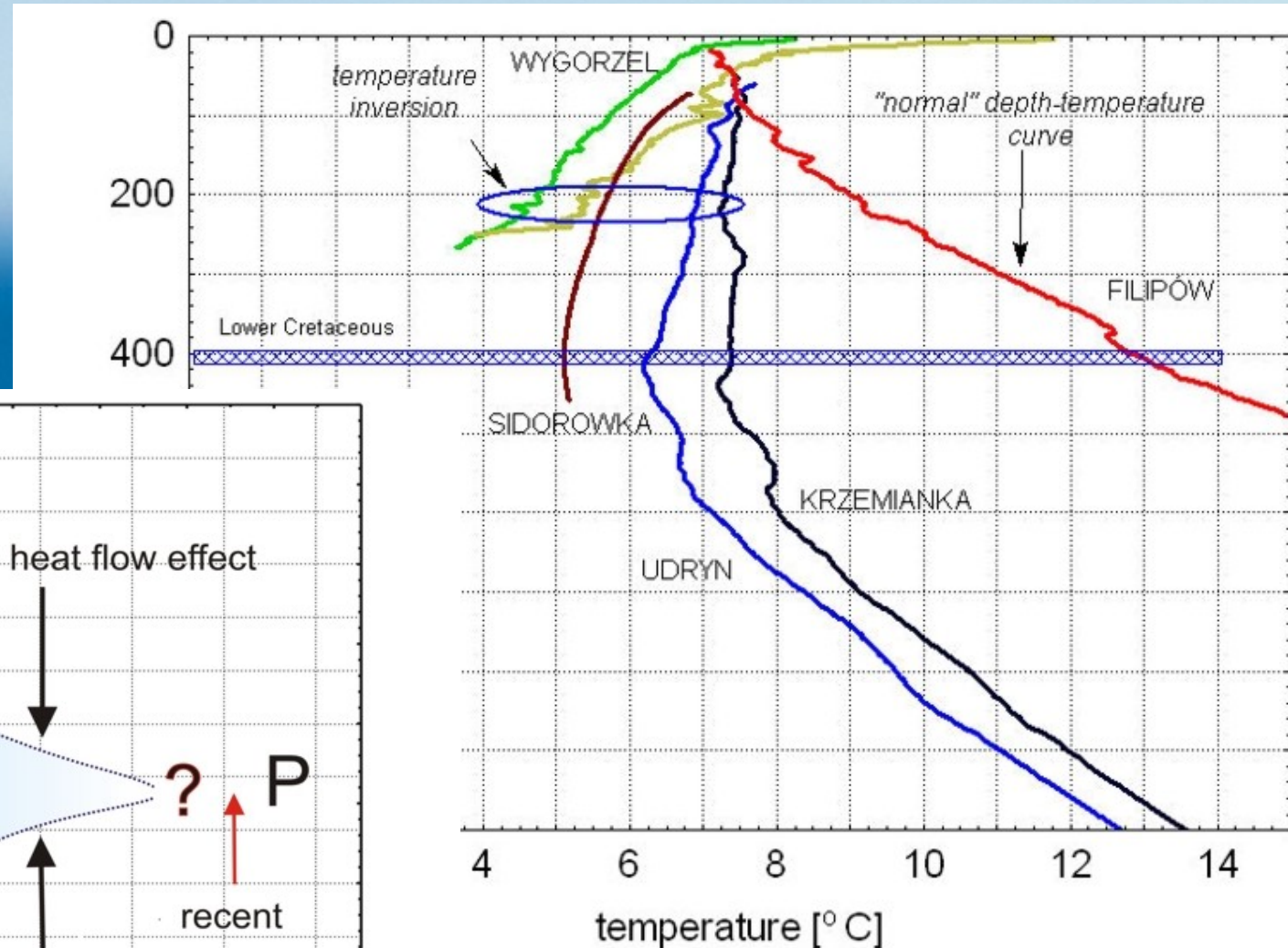
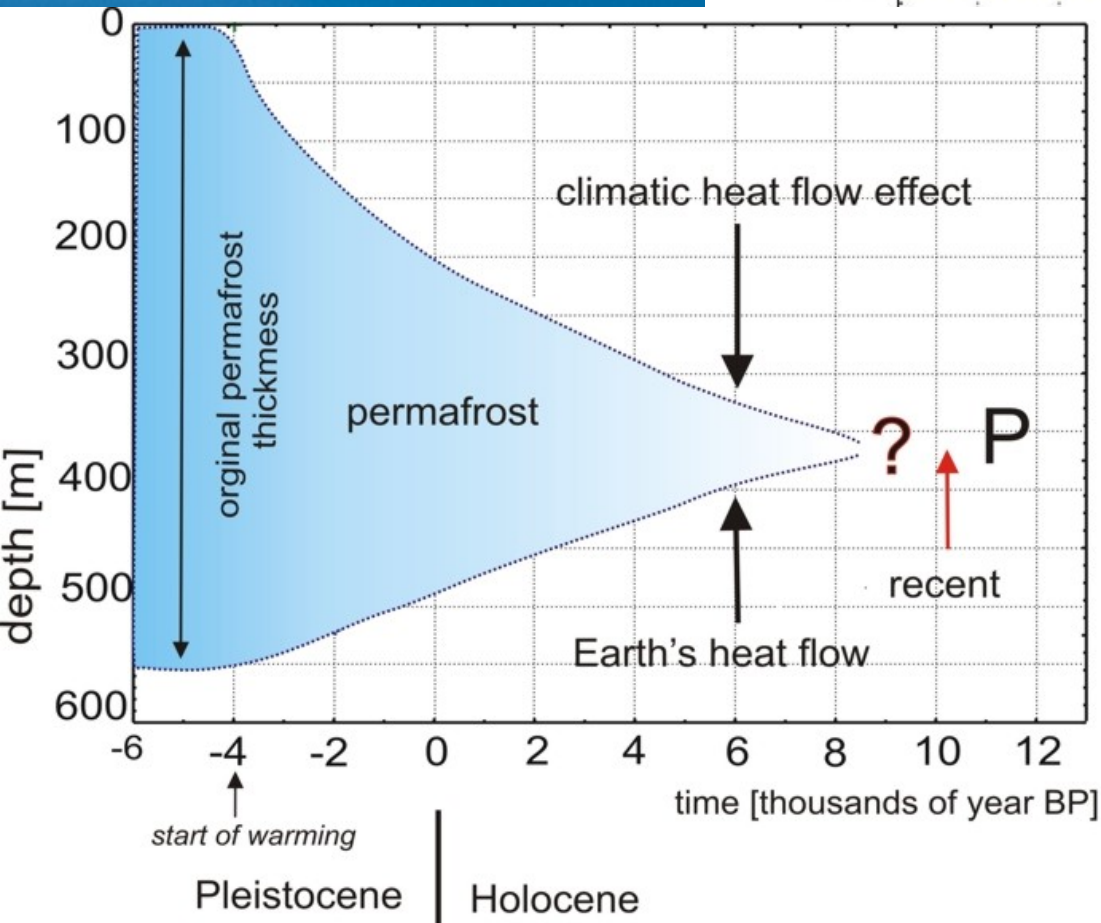
Temperatury odzyskane z pionowych profili w odwiertach z całego świata (powyżej) zgadzają się z zapisami meteorologicznymi ostatnich 150 lat ale wskazują na zimniejsze temperatury Małej Epoki Lodowej niż współczesne rekonstrukcje klimatu (po lewej)

*Ref 3 = Jones et al. 1998, Ref 4 = Mann et al. 1998*

*Huang, Pollack, Shen 2000 (Nature)*

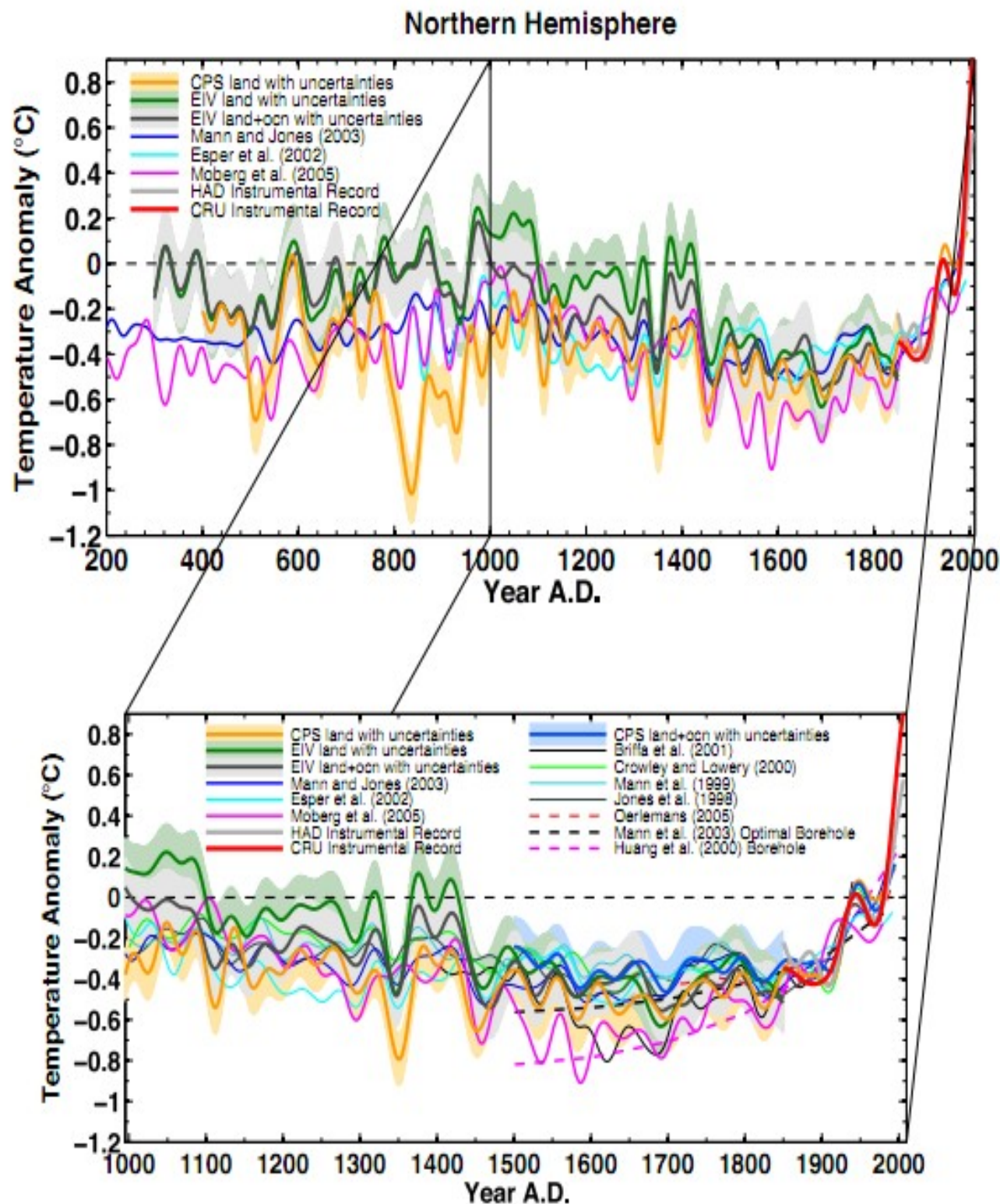
# Ciekawostka: czy pod Suwalszczyzną jest jeszcze wieczna zmarzlina z epoki lodowej?

Na Suwalszczyźnie w odwiertach notuje się szczególnie duże inwersje temperatury. Czy aż tak duże aby nadal była tam wieczna zmarzlina?



Odwiert w Szypliszkach znalazł latem 2010 wieczna zmarzlinę na głębokości 350 m

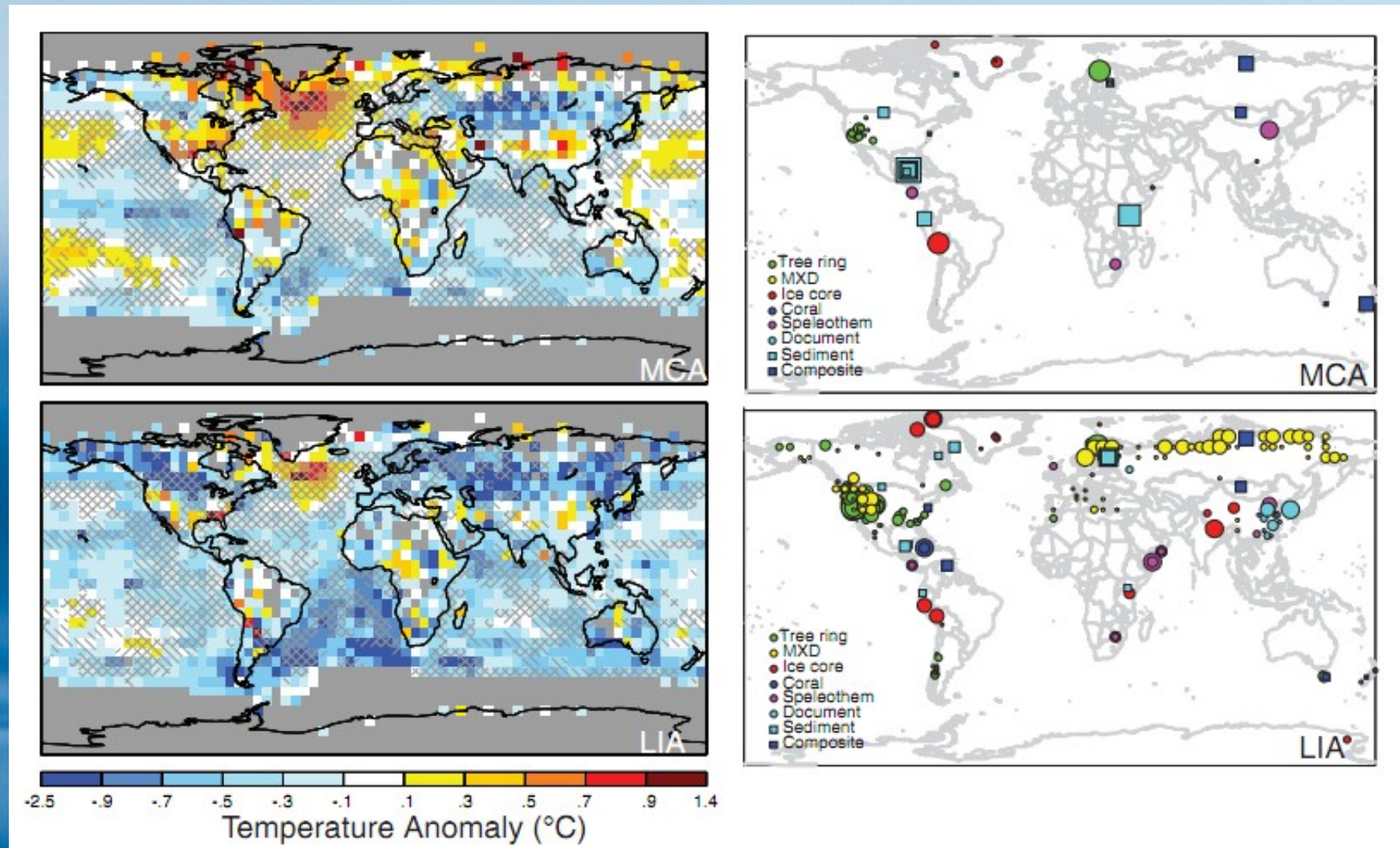
*Państwowy Instytut Geologiczny*



## 1800 lat klimatu półkuli północnej

Najlepsza jak dotąd rekonstrukcja klimatu półkuli północnej w ciągu ostatnich 1800 lat wykonana dwoma metodami (zielona i pomarańczowa) oraz wcześniejsze rekonstrukcje. Mała epoka lodowa (LIA) i ciepłe wczesne średniowiecze (MCA) są już tu widoczne. Ale czy są zjawiskami tylko północnej półkuli?

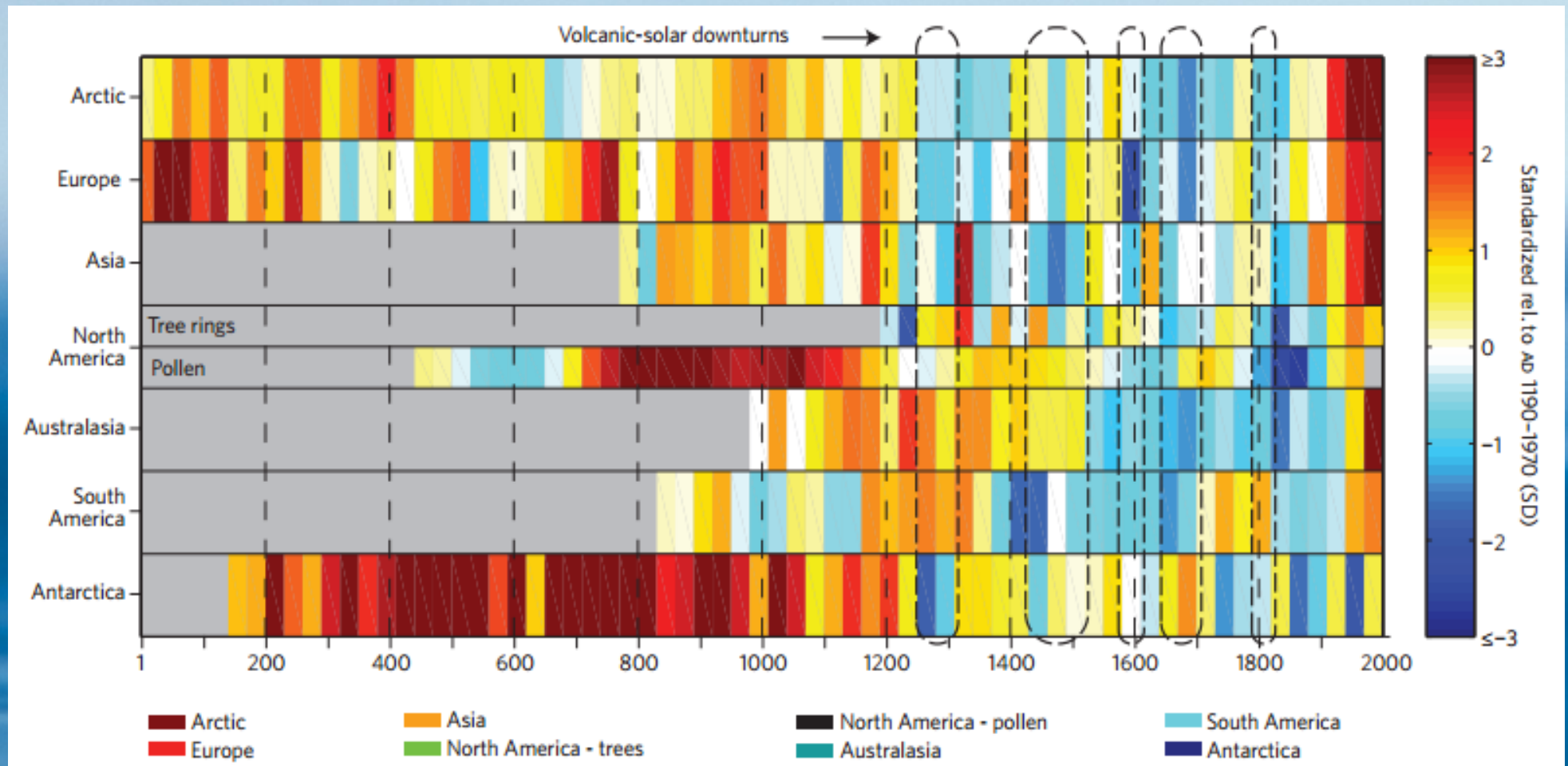
# Anomalia średniowieczna i mała epoka lodowa



Na podstawie istniejących proxy (po prawej) Mann i inni 2009 odważyli się zrekonstruować globalnie MCA (na górze) i LIA (na dole). Rekonstrukcja wskazuje na silny element zmian THC oraz na zimny wschodni tropikalny Pacyfik (permanentna La Niña) w średniowieczu oraz na ogólne oziębienie (szczególnie kontynentów) w XVII-XIX wieku.

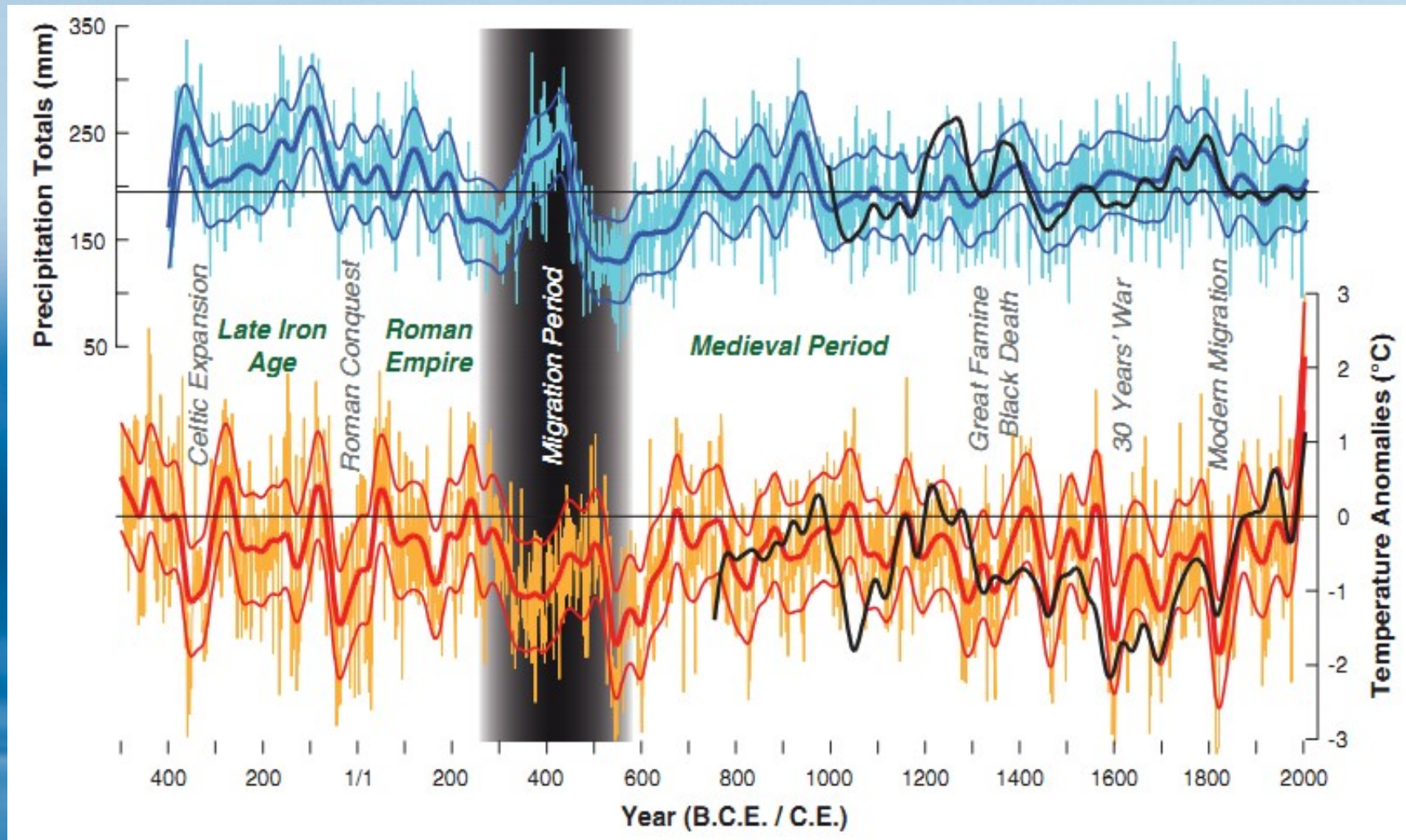
*Mann et al 2009 (Science)*

# MCA i LIA nie były globalne



Rekonstrukcja 2000 lat temperatur 7 kontynentów (sic!) wykonana przez konsorcjum PAGES 2k pokazuje, że nie było globalnych synchronicznych okresów MCA i LIA, występowało natomiast stopniowe ochłodzenie, zakończone ok. AD 1880.

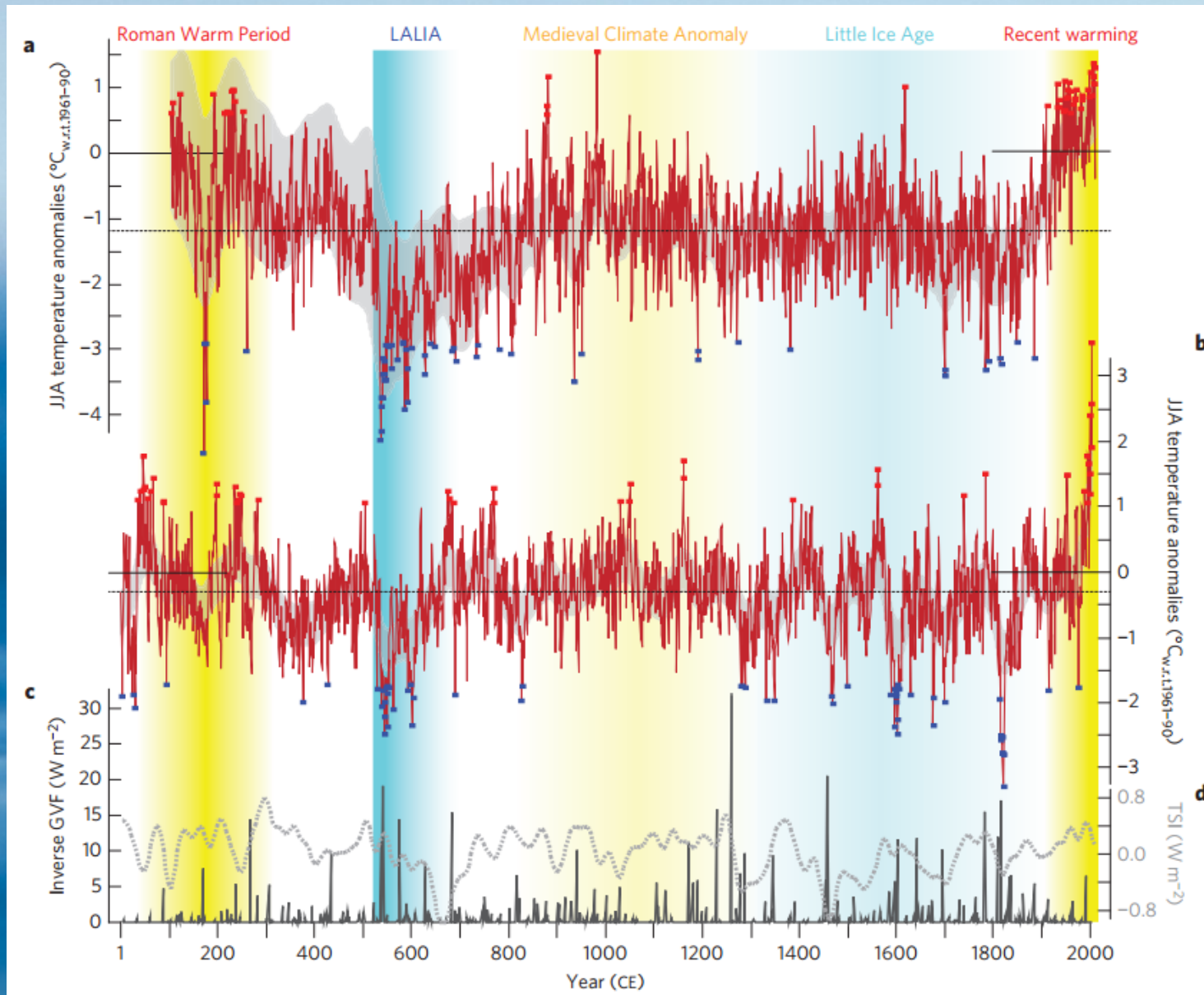
# Jednak nawet w Europie sytuacja była bardziej skomplikowana



Nawet w Europie sytuacja była bardziej skomplikowana niż ciepłe MCA i zimne LIA. Rekonstrukcja 2500 lat opadów (na górze) i temperatur (na dole w Europie Środkowej na podstawie słoików drzew wskazuje na przykład na wyjątkowo mokry i chłodny okres Upadku Cesarstwa rzymskiego i Wędrówek Ludów.

*Büntgen et al 2011 (Science)*

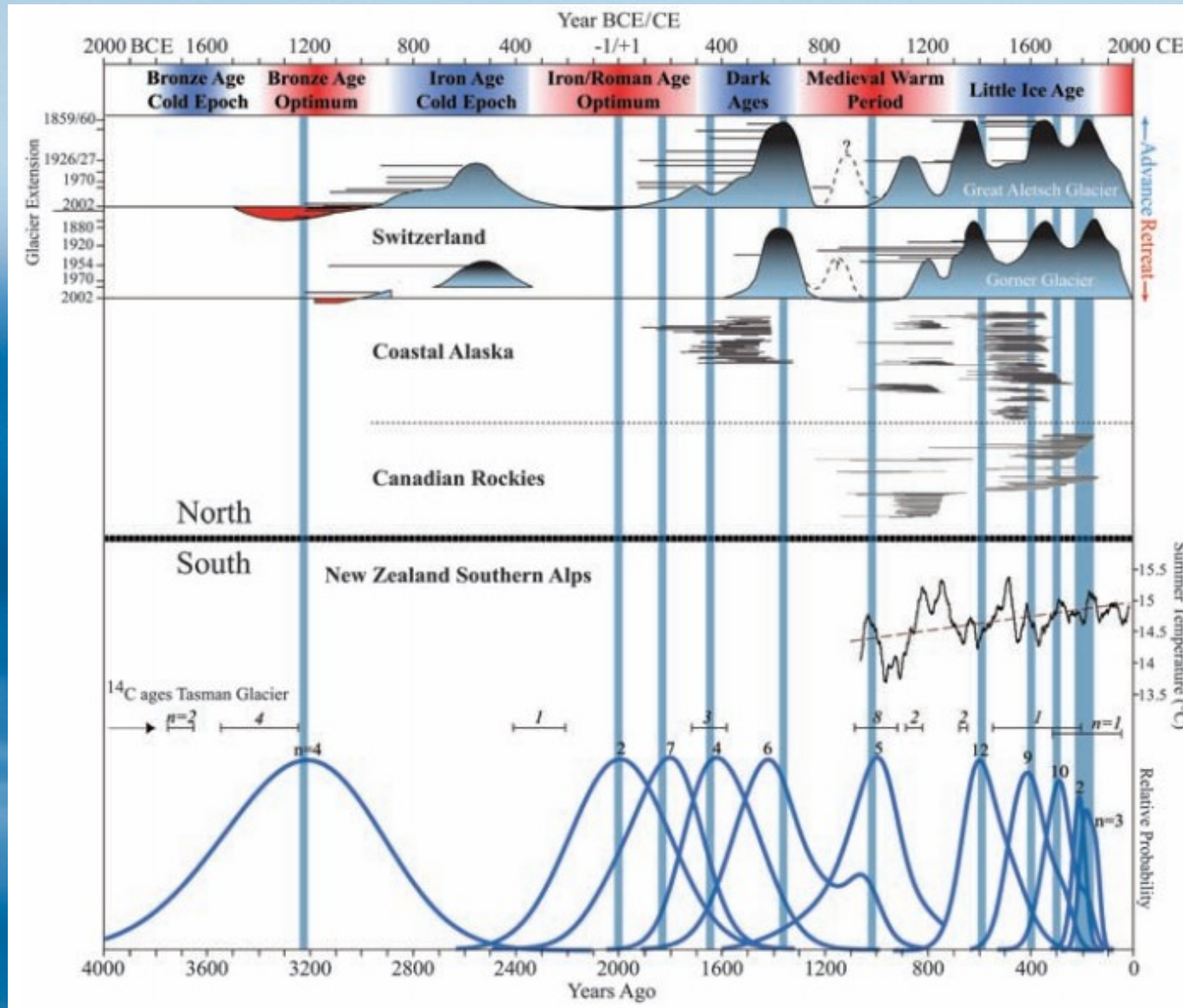
# Uaktualnienie: “Mała epoka lodowa późnego antyku”



Kolorem niebieskim oznaczono LALIA (Late Antique Little Ice Age), zimny okres 536-660 AD, który był prawdziwym końcem Starożytności.

*Büngten et al 2016 (Nature Geoscience)*

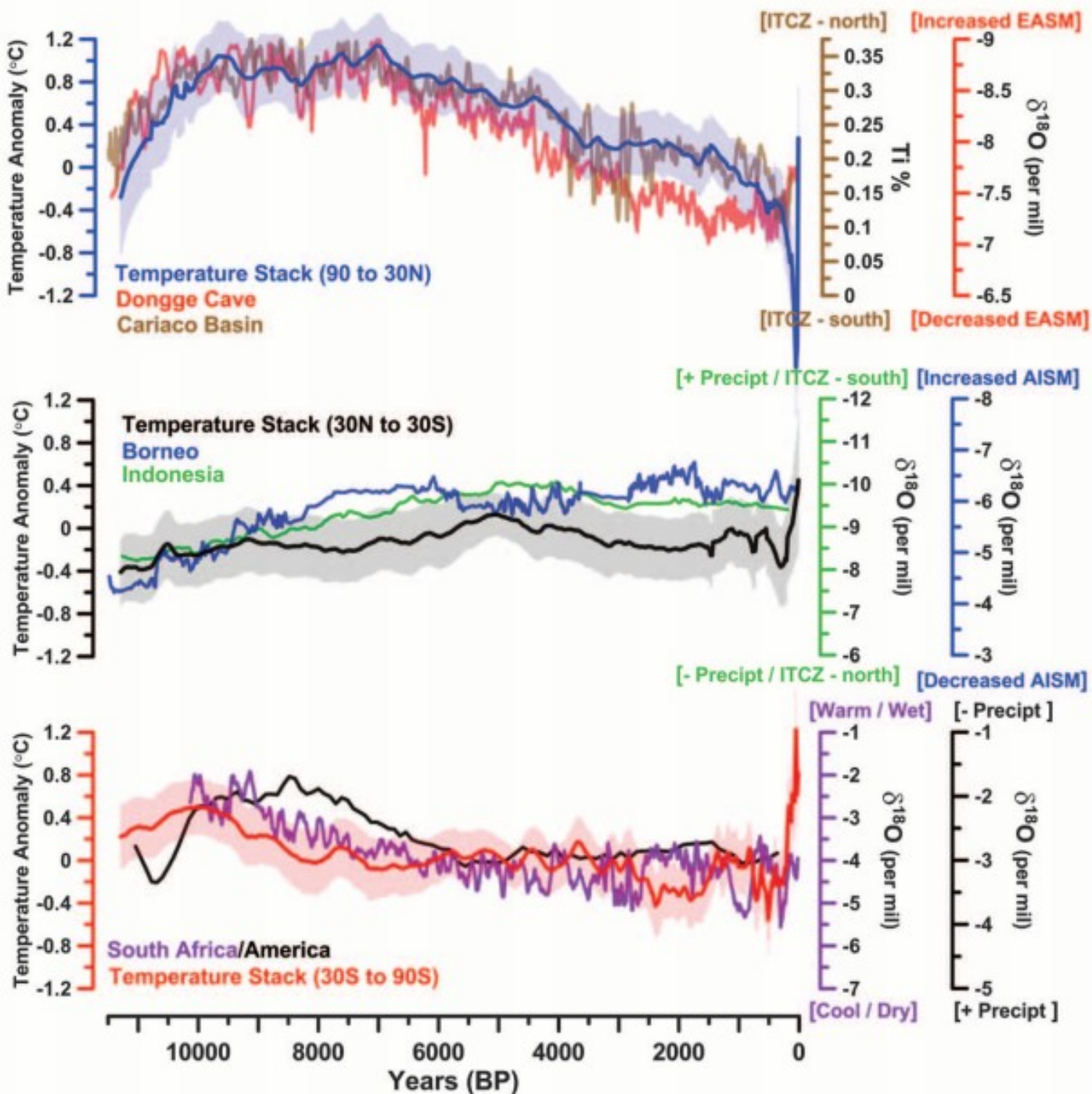
# Zmiany w holocenie: niesynchroniczne



Niesynchroniczność okresów powiększania się lodowców na północnej (na górze) i południowej półkuli (na dole) świadczy o zmianach cyrkulacji termohalinowej także w holocenie.

*Schaefer et al 2009 (Science)*

# Temperature 11,300 lat z rdzeni oceanicznych

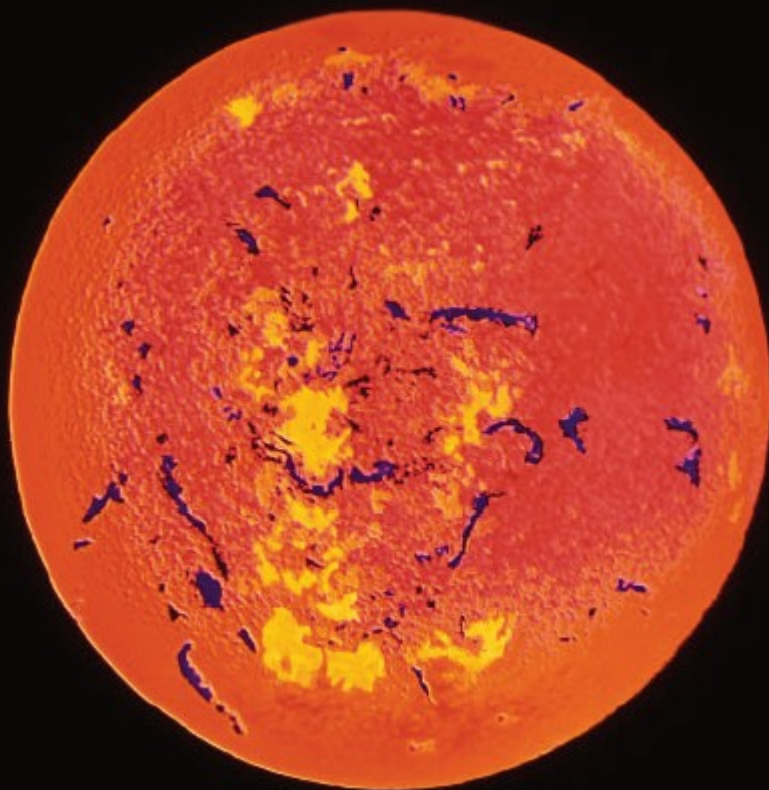


Rekonstrukcja temperatur ostatnich 11,300 lat z 73 “proxy” z całej kuli ziemskiej dla półkuli północnej (góra), tropików (środek) i półkuli południowej (dół).

# Plamy na słońcu



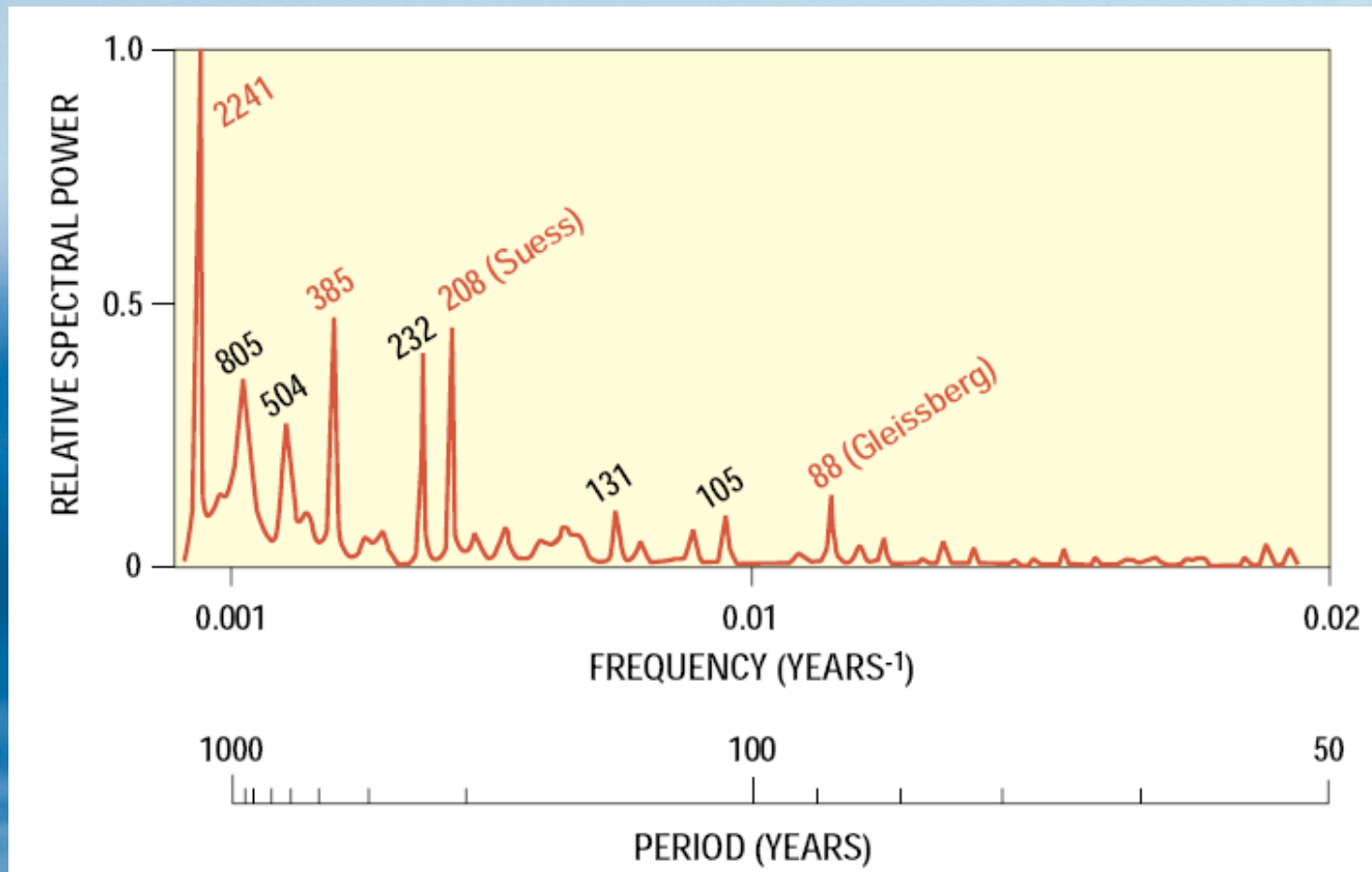
Relative size of Earth → •



Obecność plamy na Słońcu, widomego objawu zaburzeń pola magnetycznego paradoksalnie zwiększa średnią jasność powierzchni słońca. Dodatkowo zwiększa się w tym czasie ilość cząstek wiatru słonecznego.

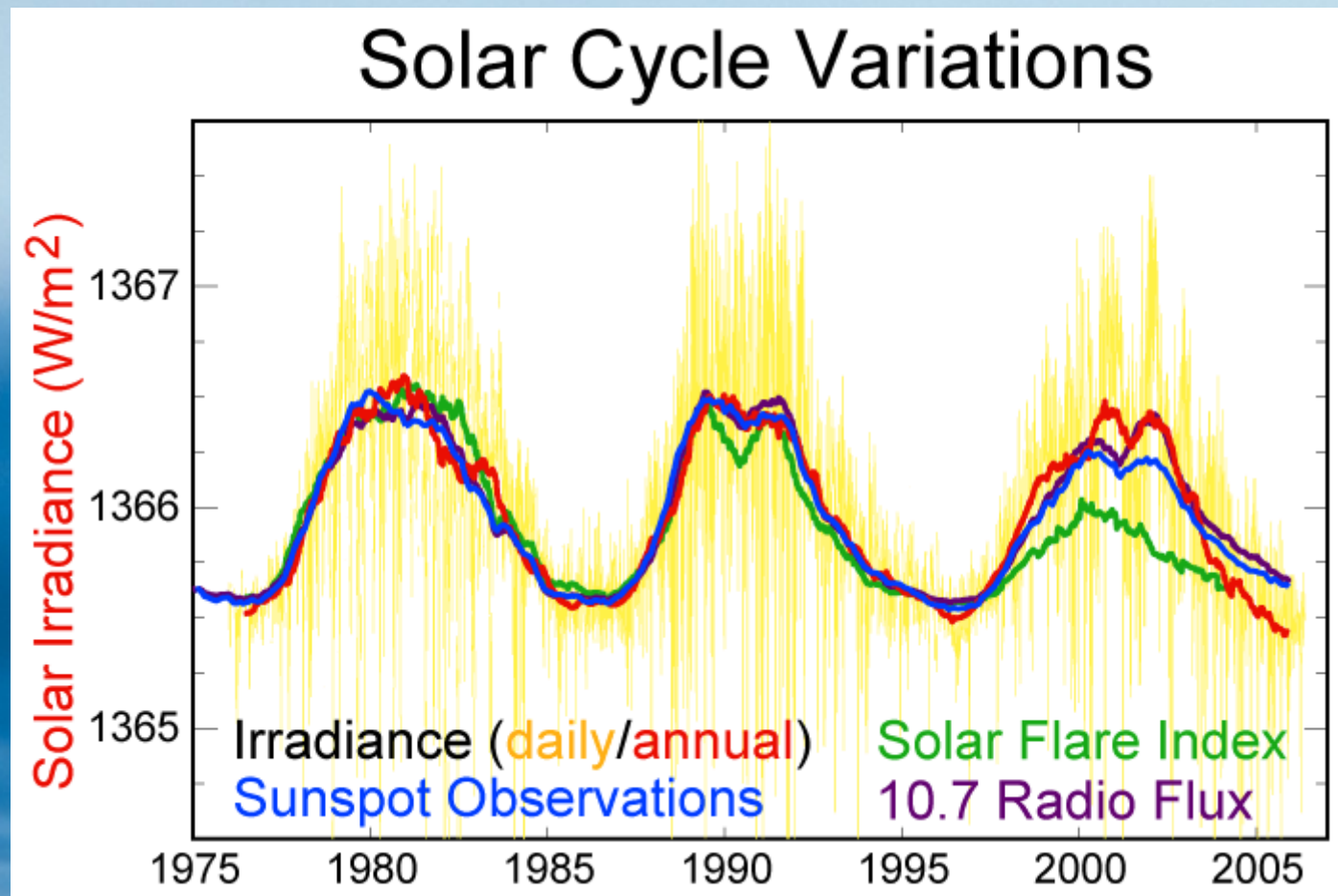
*Źródła: Wikipedia oraz Reimer 2004*

# Powtórzenie: cykle słoneczne dłuższe niż 11 i 22 lata



Aktywność Słońca mierzona koncentracją  $^{14}\text{C}$  w słojach drzew wykazuje wiele cykli w zakresie setek lat. Szczególnie cykle o długości 88 i 208 lat są na tyle widoczne w wielu zapisach paleoklimatycznych, że zyskały własne nazwy (Gleissberg i Suess).

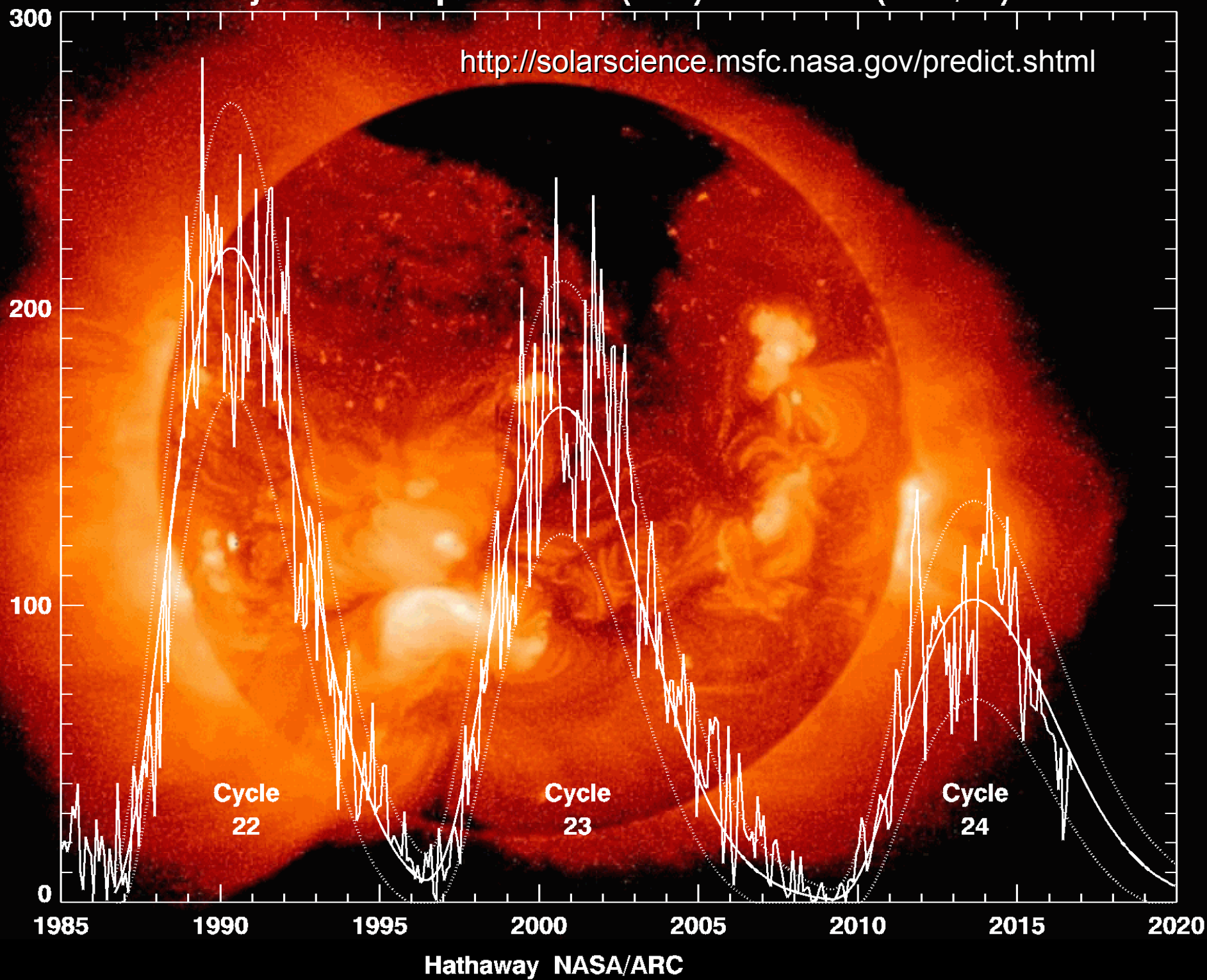
# Cykl plam na słońcu: 11 lat



W ciągu 11-cyklu swojej aktywności Słońce zmienia swą jasność o około 0,1%. Jednak jasność słońca w ultrafiolecie (ogrzewającym stratosferę poprzez swoją absorpcję przez ozon) zmienia się nawet trzykrotnie. Wpływa to na zmiany temperatury w pobliżu powierzchni ziemi bezpośrednio i przez przesunięcie tras niżów w stronę biegunów (Haigh 1996). Wpływ tego cyklu na klimat wykazał już - poprzez ceny zboża! - Herschel w 1864 r.

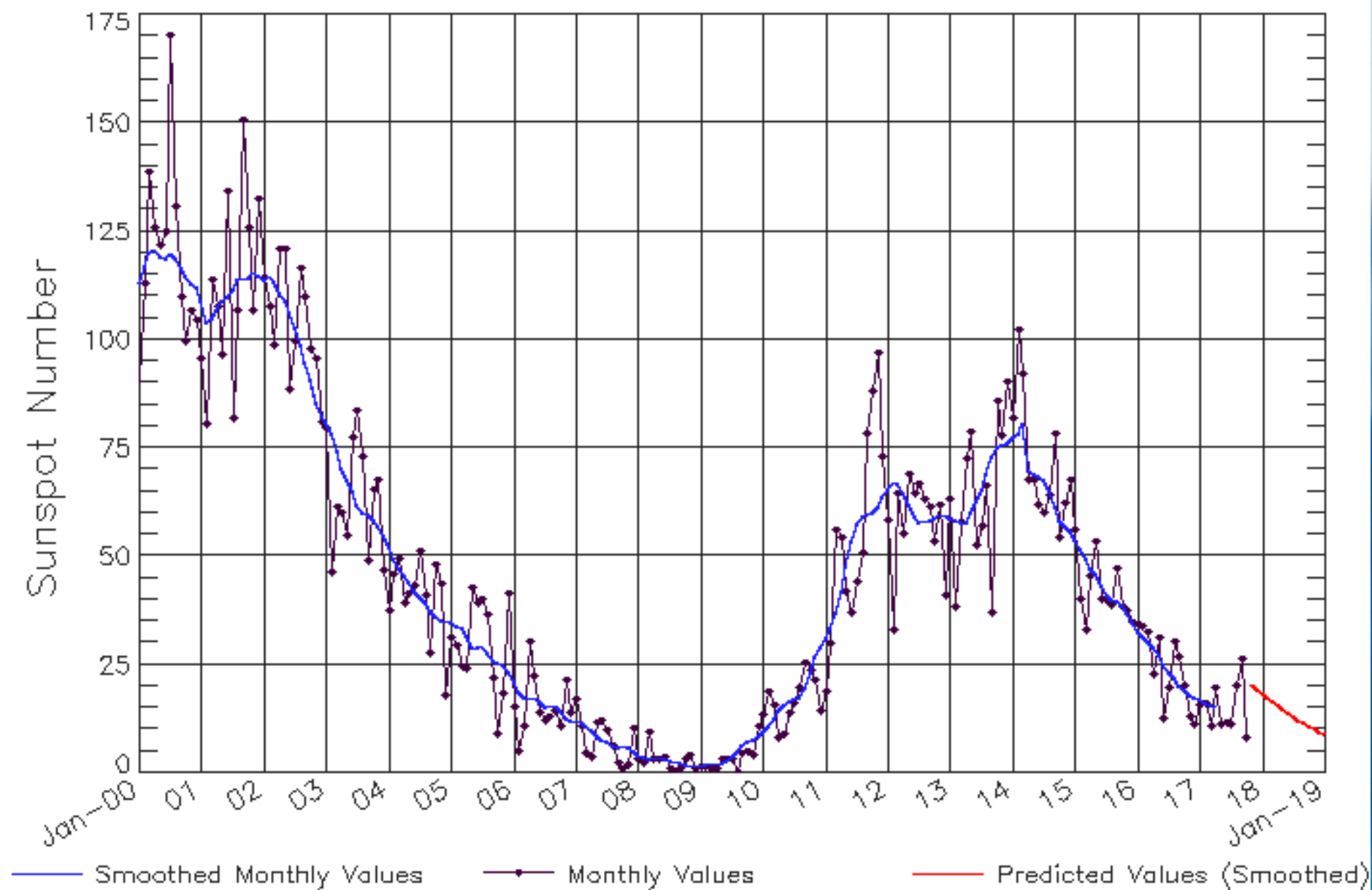
# Cycle 24 Sunspot Number (V2.0) Prediction (2016/10)

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>



# ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

Observed data through Oct 2017

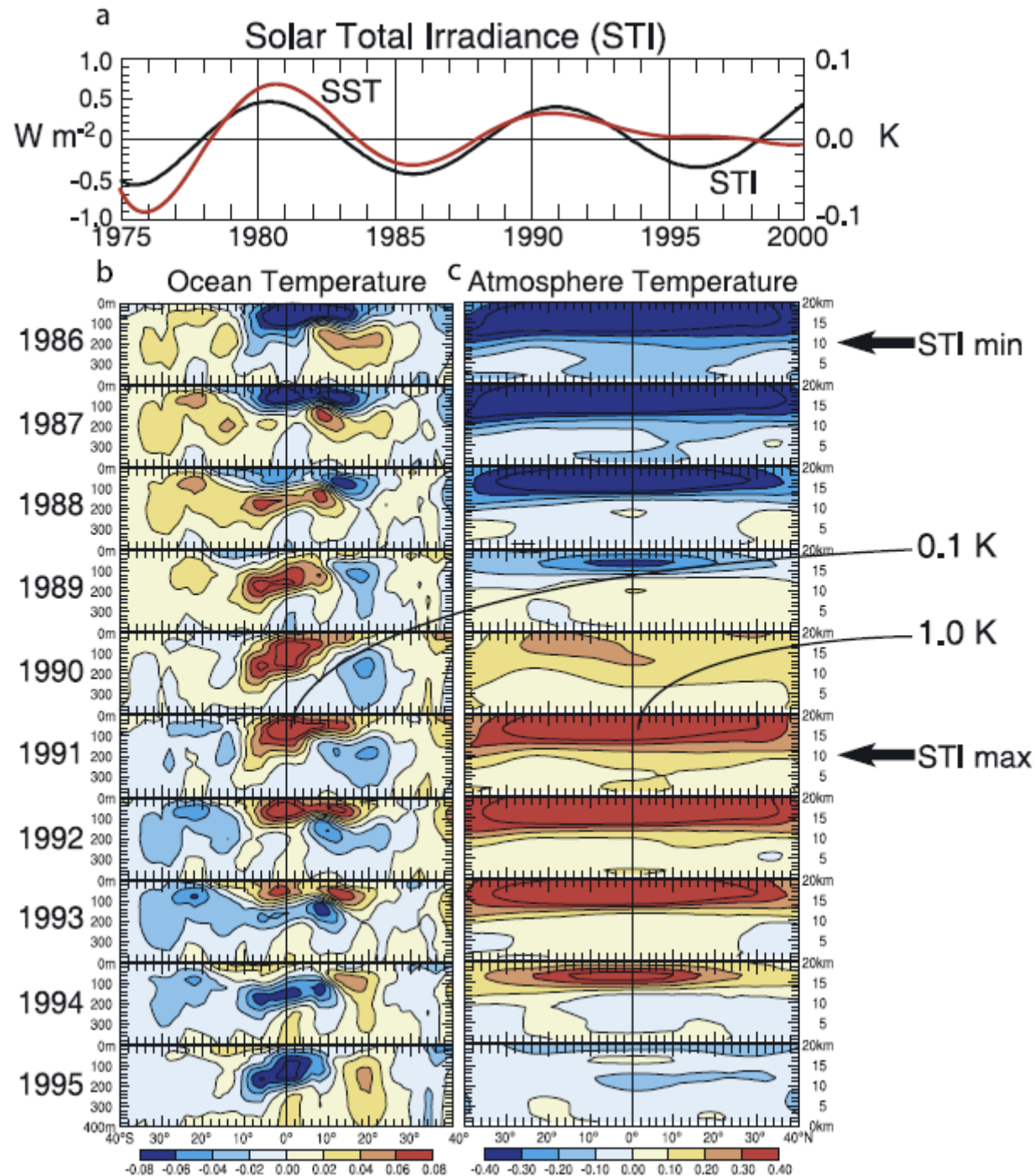


Updated 2017 Nov 6

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

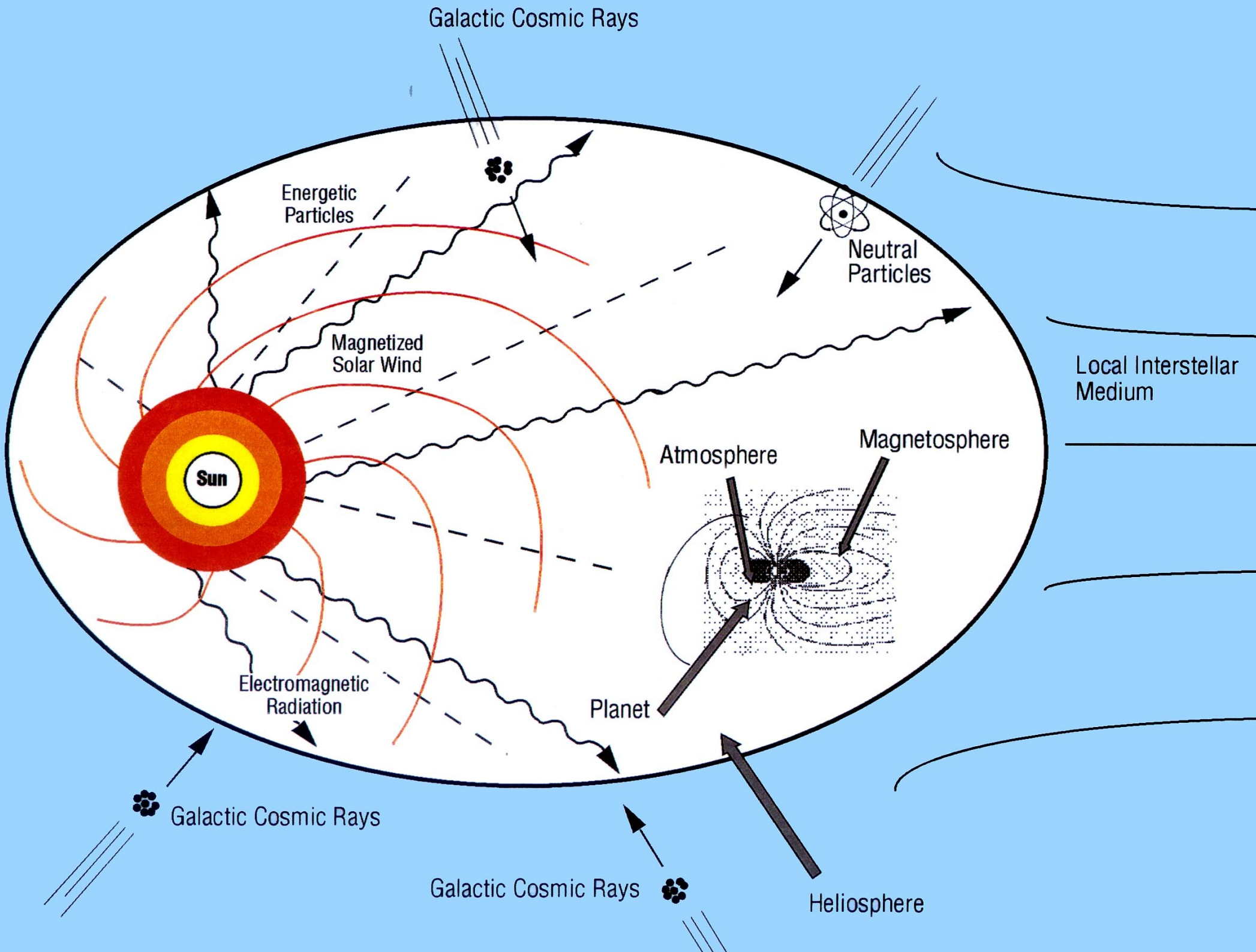
<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

# Bezpośredni dowód wpływu cyklu 11 letniego na klimat

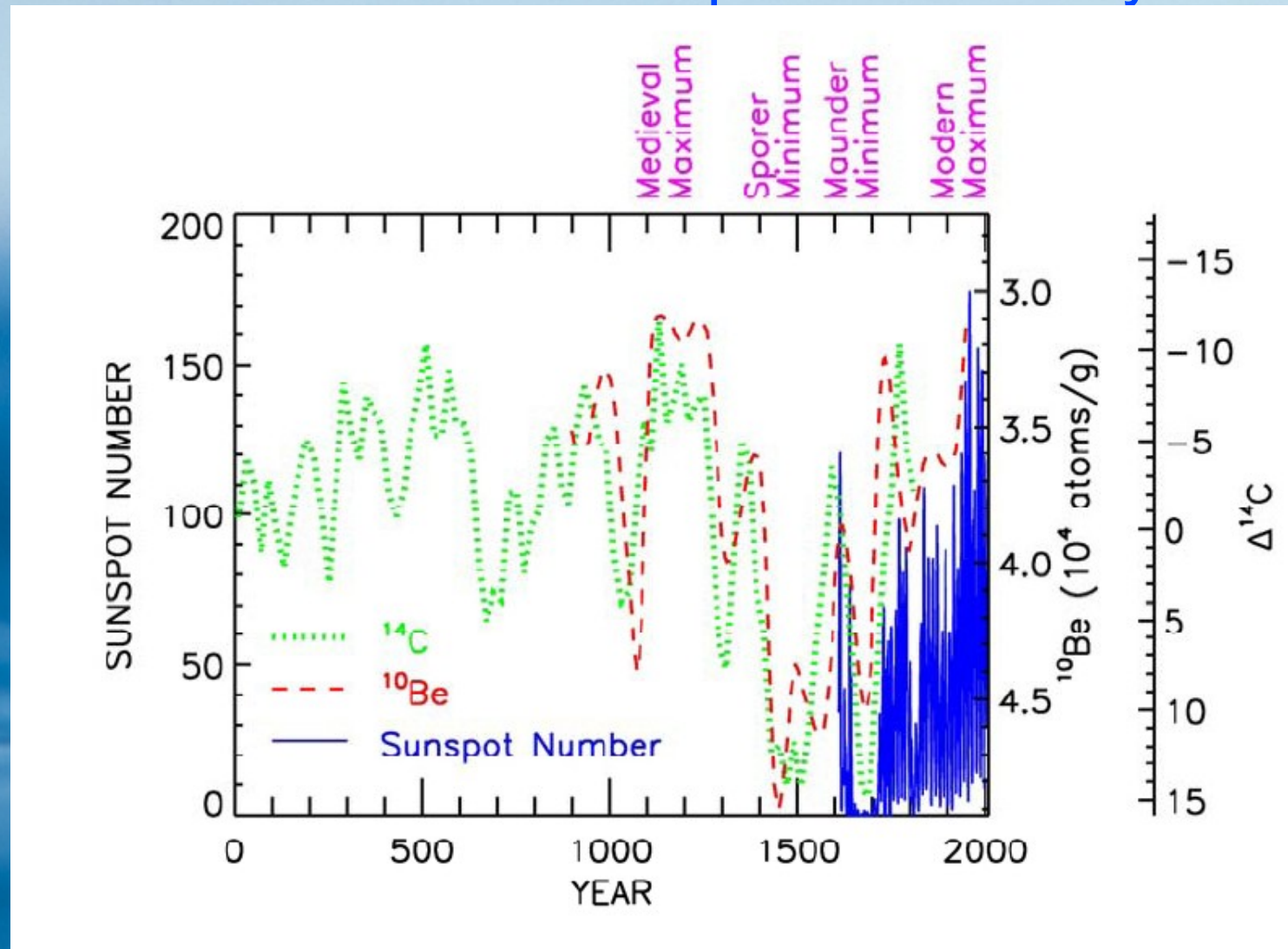


Współzmiennność “stałej słonecznej” i temperatury powierzchni morza w tropikach (góra) oraz rozprzestrzenianie się sygnału termicznego w profilu oceanu (po lewej) i atmosfery (po prawej).

Niedawno zaczęto jednak kwestionować i to, np. Love et al 2011.



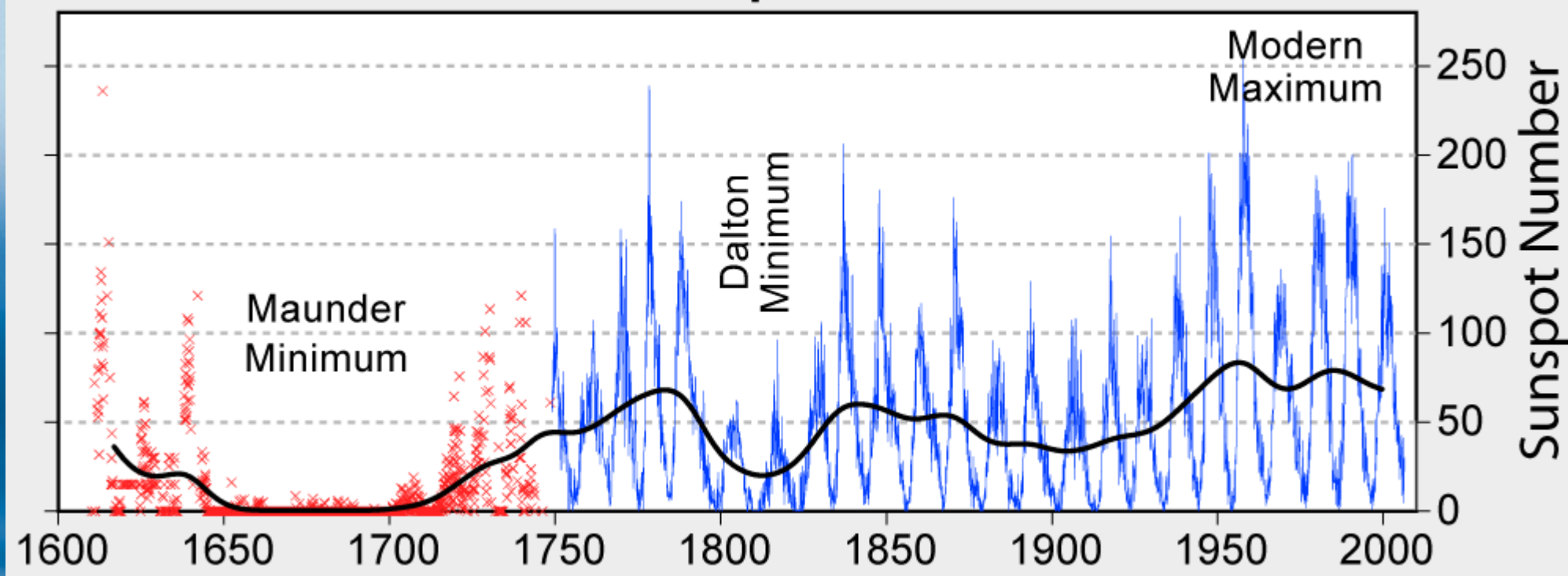
# Dlaczego $^{14}\text{C}$ i $^{10}\text{Be}$ mogą służyć do rekonstrukcji dawnych wartości indeksów plam słonecznych?



Plamy na słońcu ↑, jasność słońca ↑, temperatura powierzchni Ziemi ↑, słoneczne pole magnetyczne ↑, promieniowanie kosmiczne ↓, zachmurzenie ↓ (?), produkcja  $^{14}\text{C}$  i  $^{10}\text{B}$  w stratosferze ↓

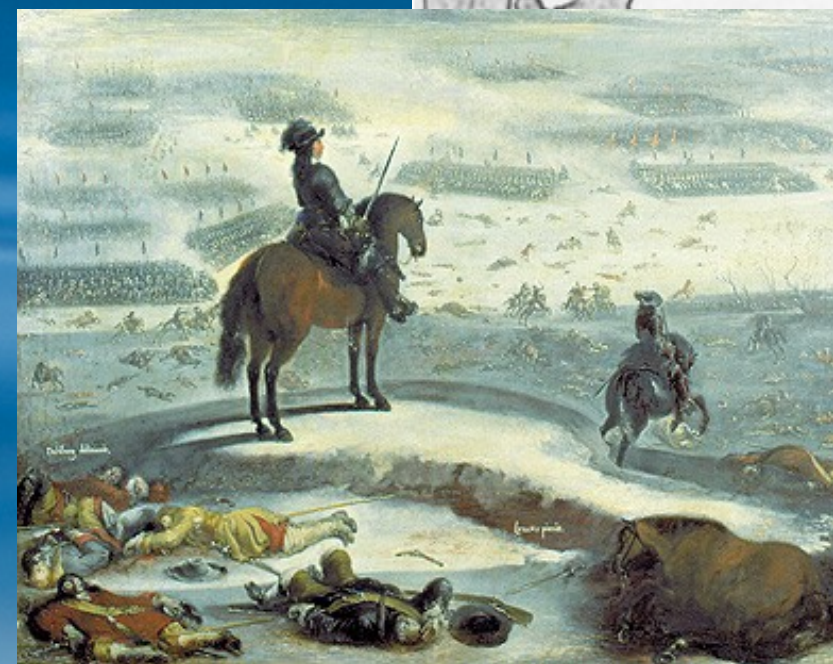
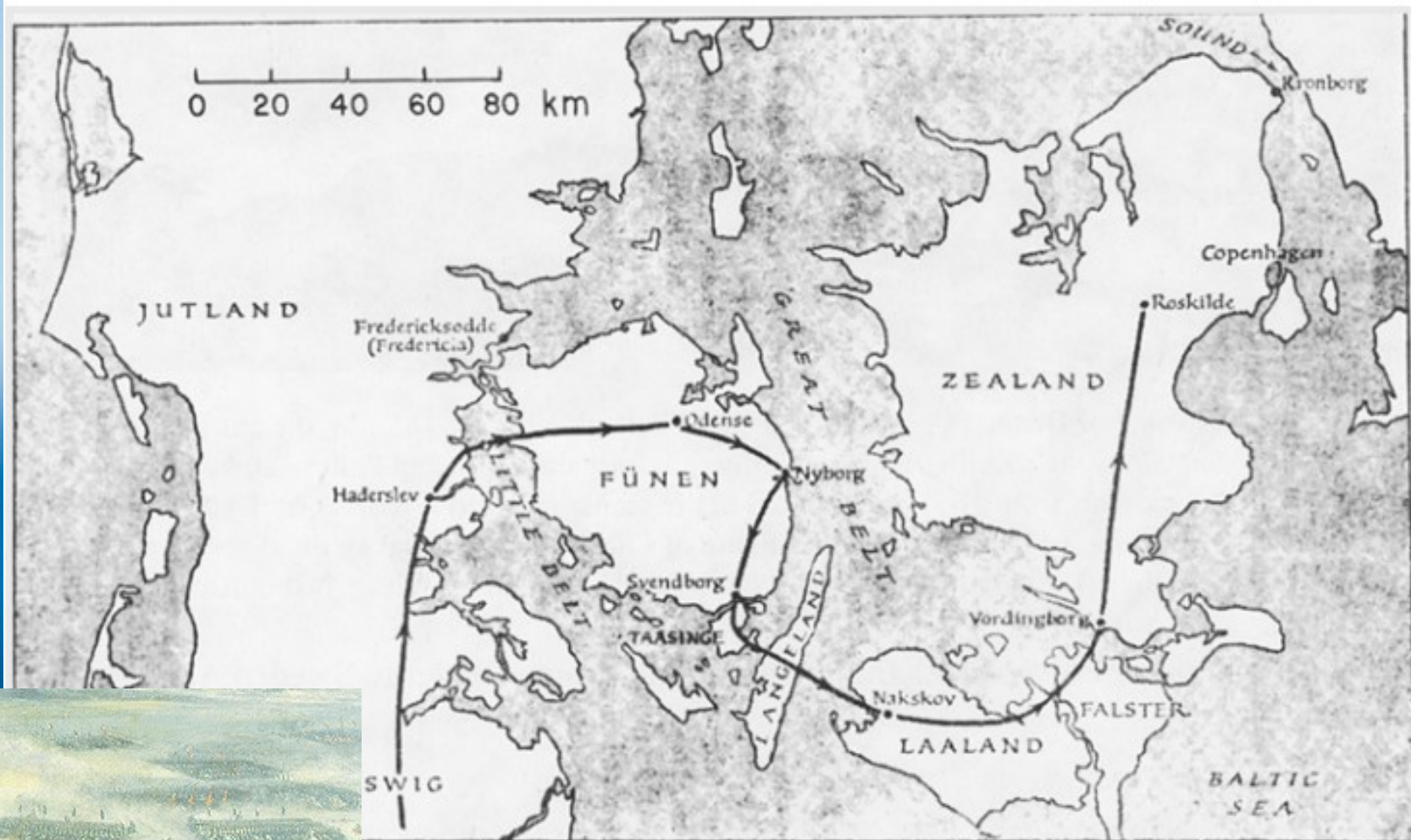
*Raport NRC 2006, za Froöhlich & Lean 2004*

# 400 Years of Sunspot Observations



Liczba plam słonecznych obserwowana jest od 400 lat.

Najgłębsze minimum aktywności słonecznej przypada na szczyt “Małej Epoki Lodowej”.

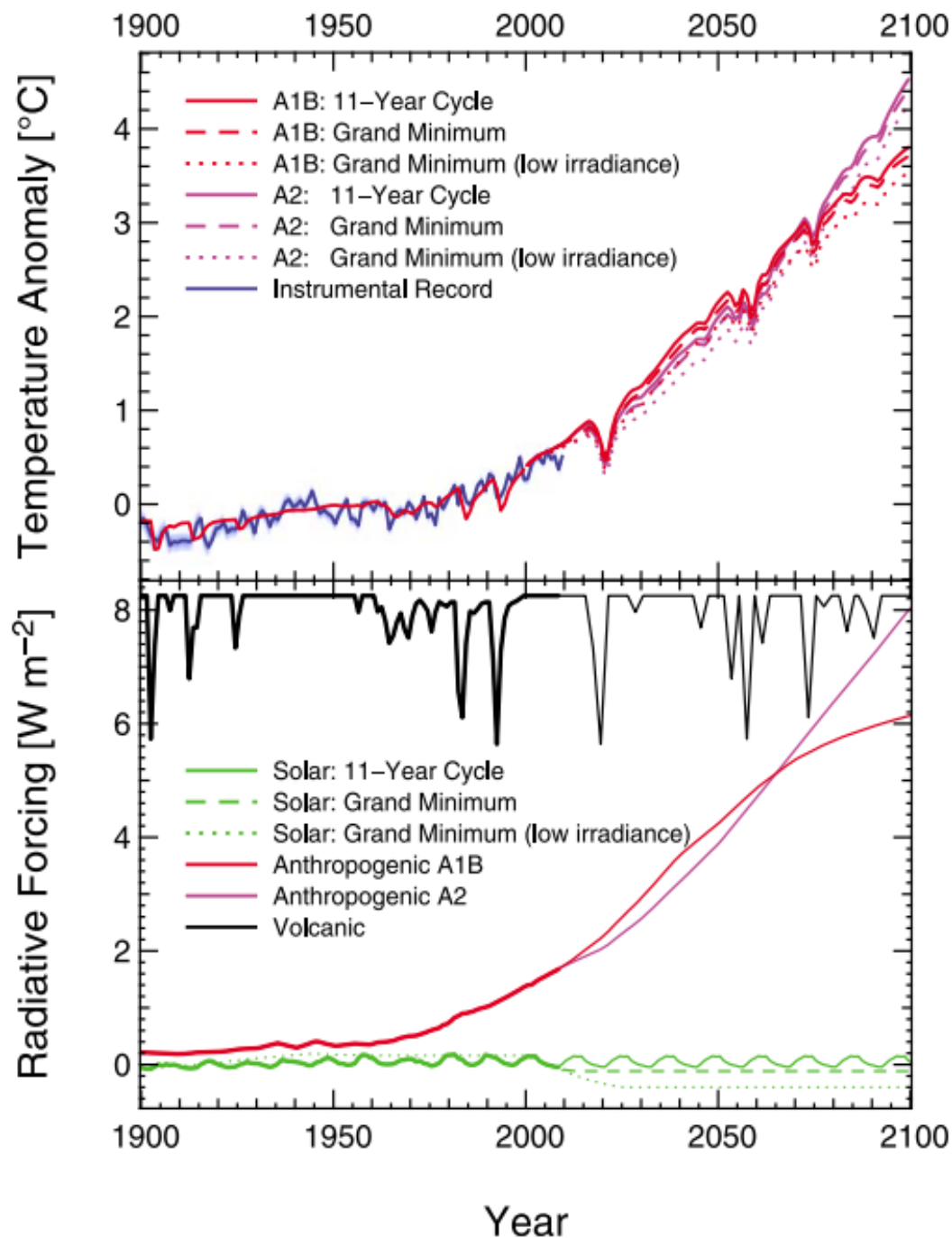


Karol Gustaw przeprawia się przez  
Wielki Bełt (1658 r.)

W czasie “potopu szwedzkiego” Karol Gustaw wykorzystał jedną z najzimniejszych zim Małej Epoki Lodowej aby przeprawić się przez Mały i Wielki Bełt w lutym 1658 i zmusić Danię do kapitulacji.

*Lindgren & Neumann 1982 (Climatic Change)*

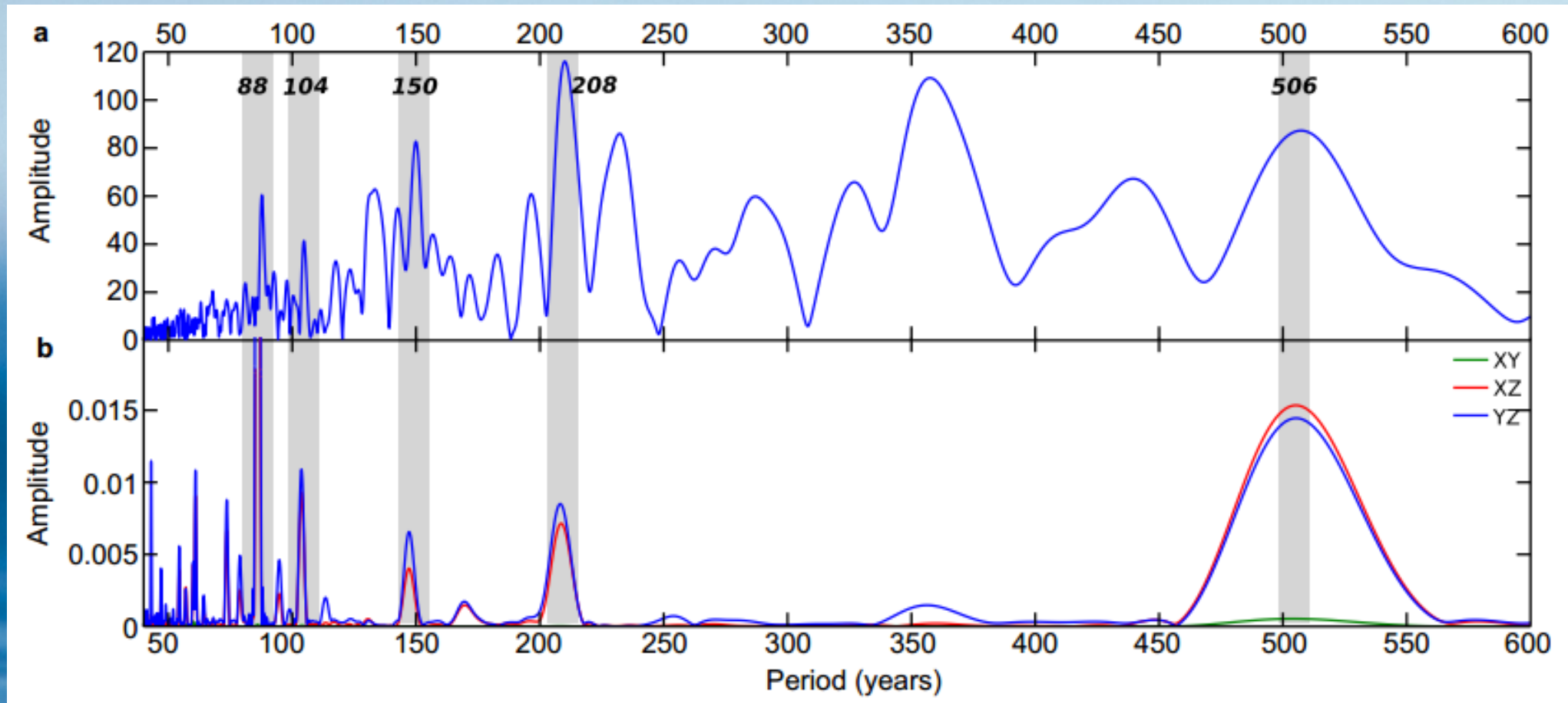
# A co by było gdyby Minimum Maundera się powtórzyło?



Symulacje modelem klimatycznym globalnych temperatur w XXI wieku, w którym przewidywane w scenariuszach IPCC antropogeniczne wymuszenia radiacyjnych wzbogacono o Minimum Maundera rozpoczynające się w 2010 roku (dwie wersje) i losowe wybuchy wulkanów (częstsze niż w ostatnich dekadach).

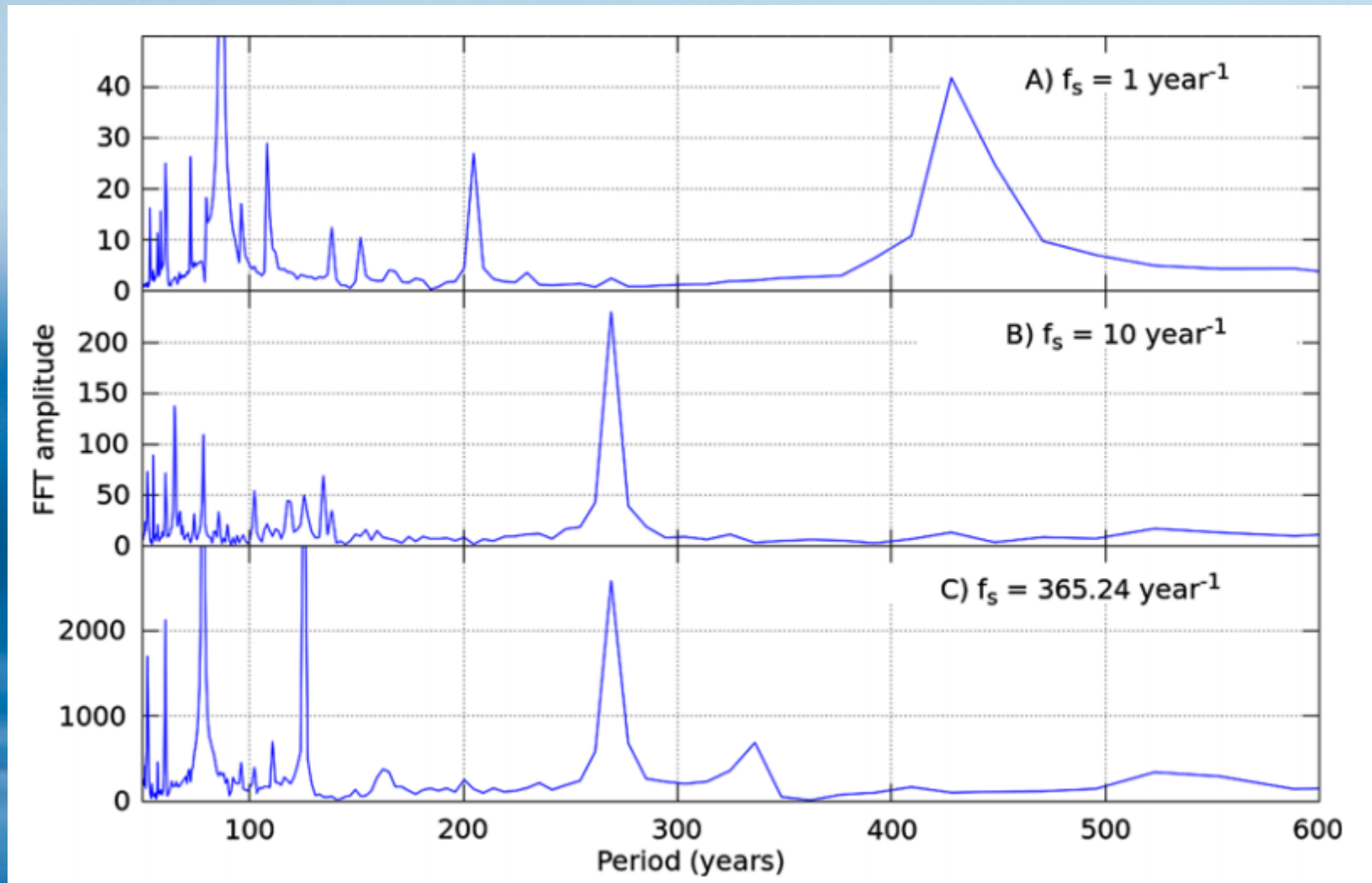
W porównaniu z ociepleniem antropogenicznym przewidywanym do końca wieku, tego typu zmiany jasności słonecznej wydają się bez znaczenia.

## Ciekawostka (?): Wpływ planet na Słońce?



Transformacja Fouriera paleodanych o aktywności słonecznej (góra) oraz obliczonej wartości momentu obrotowego jaki planety wywierają na słoneczną “tachoklinę”, granice między obszarem kontrolowanym przez przenoszenie energii promienistej (wewnątrz) i konwekcję (zewnątrz). Podobieństwo jest zdumiewające, statystyka poprawna, ale fizyka... podejrzana ;-)

## Nie ciekawostka, a błąd



Wyniki Abreu et al. 2012 zależą silnie od okresu próbkowania (którego czasowego modelu). Wybrany przez nich okres 1 roku jest stanowczo za długi dla planet wewnętrznych a co gorsza jako równy okresowi orbitalnemu Ziemi... całkowicie ignoruje jej wpływ!

*Poluianov & Usoskin 2014 (Solar Physics)*

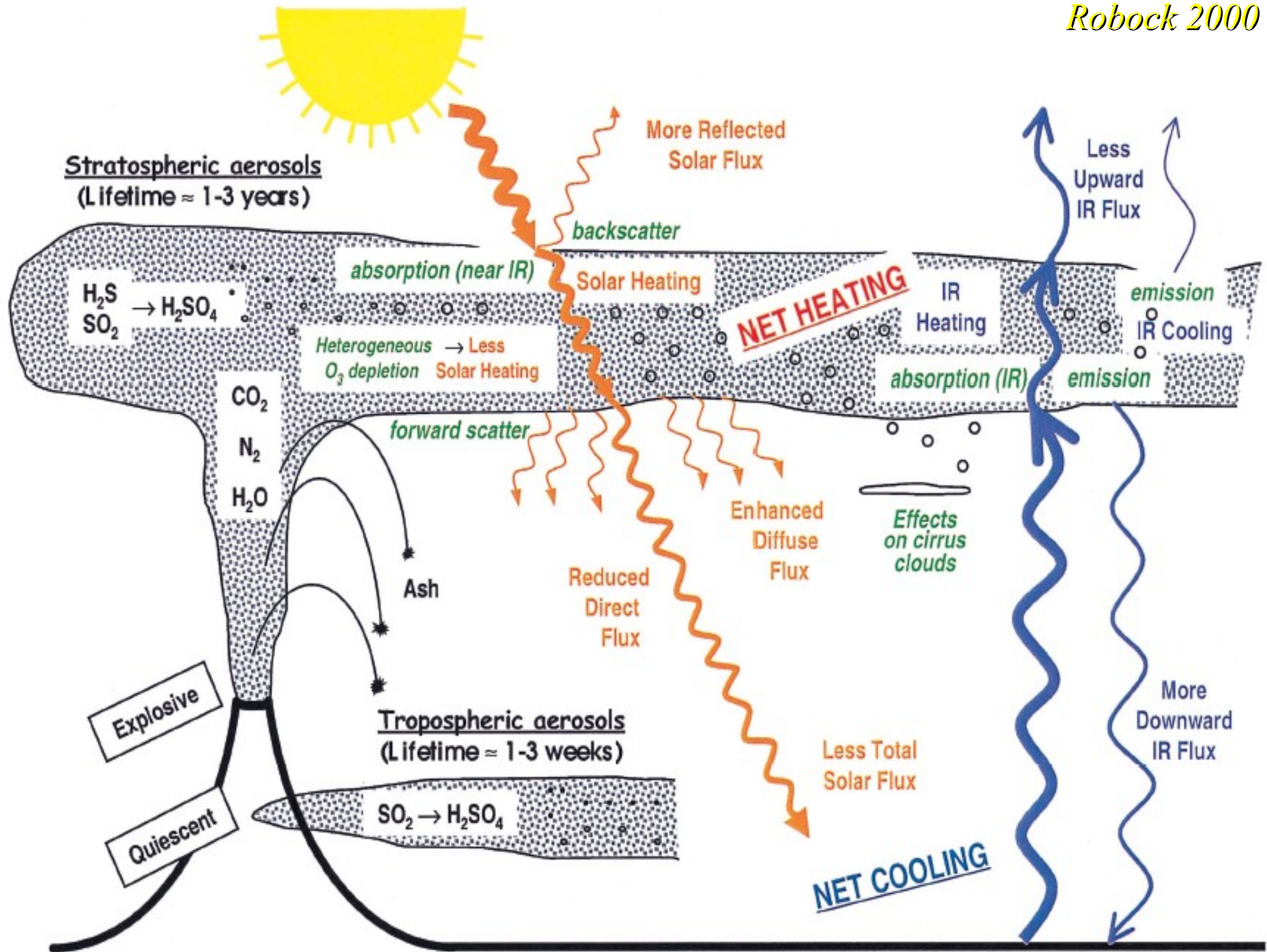
# Wpływ klimatyczny wulkanów



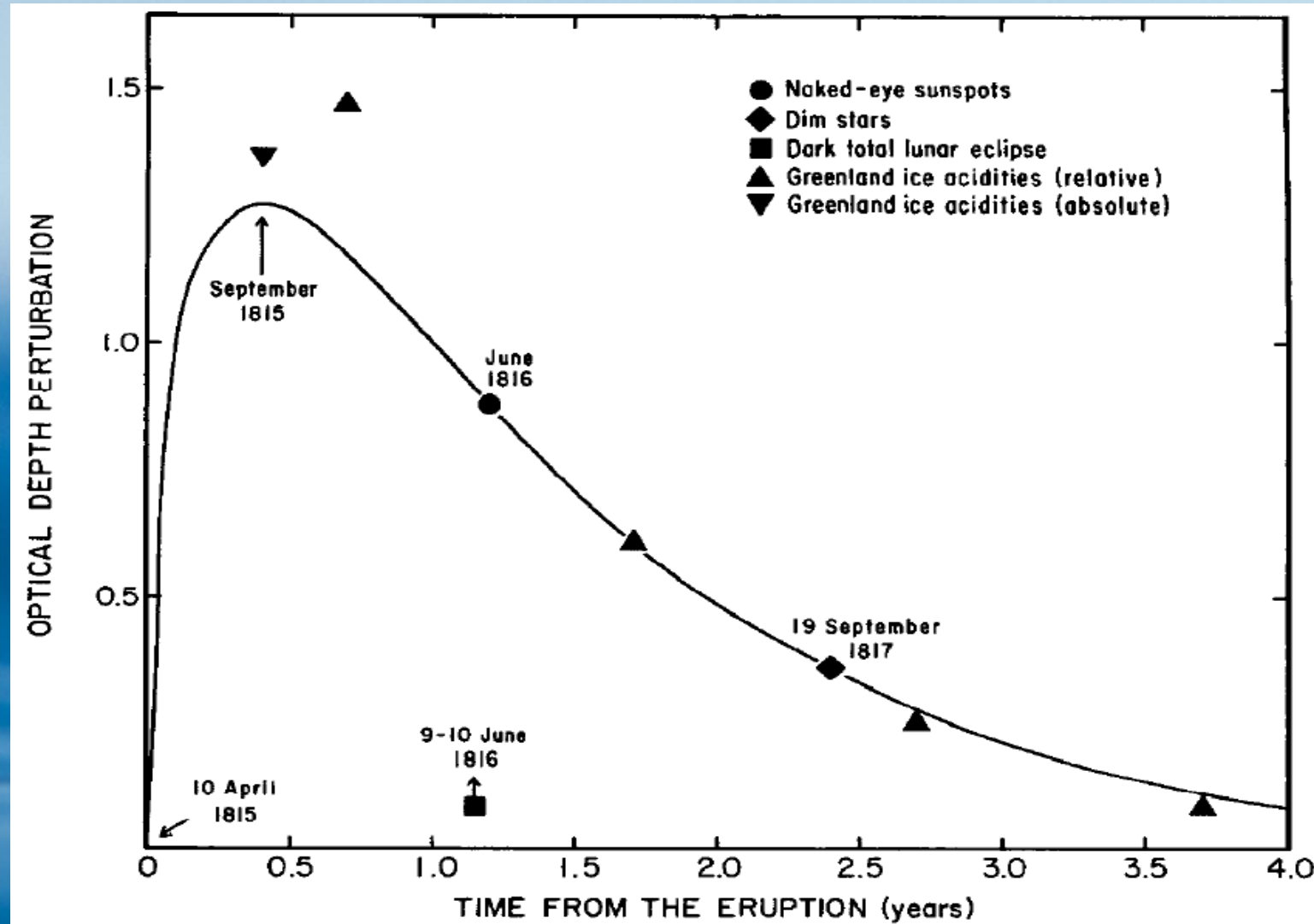
Wulkan Pinatubo (Filipiny) oraz trzy warstwy pyłu wulkanicznego sfotografowane przez załogę wahadłowca *Atlantis* (1991).

Warstwa pyłu oziębia niższe warstwy atmosfery (rozpraszanie promieniowania widzialnego przez siarczany) grzejąc jednocześnie stratosferę (poprzez absorpcję w bliskiej podczerwieni)

*De Silva 2003*



# 1816: rok bez lata



## *Głębokość optyczna atmosfery w szerokościach północnych*

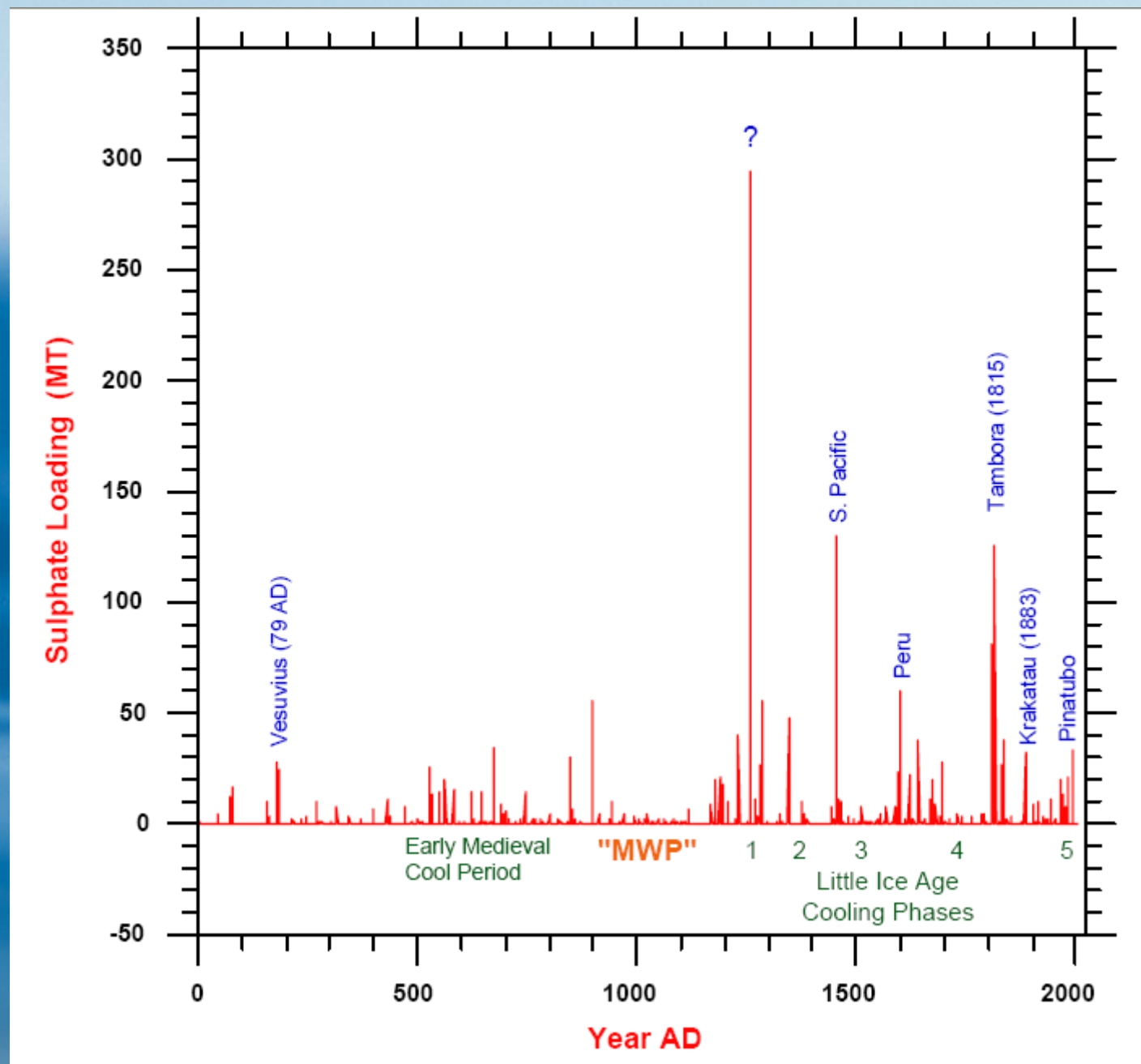
Po eksplozji wulkanu Tambora we wrześniu 1815 następne lato było szczególnie zimne w Ameryce Północnej i Zachodniej Europie (śnieżyce latem w Nowej Anglii, deszczowa pogoda w Europie, Frankenstein).

*Rampino Self Stothers 1988*

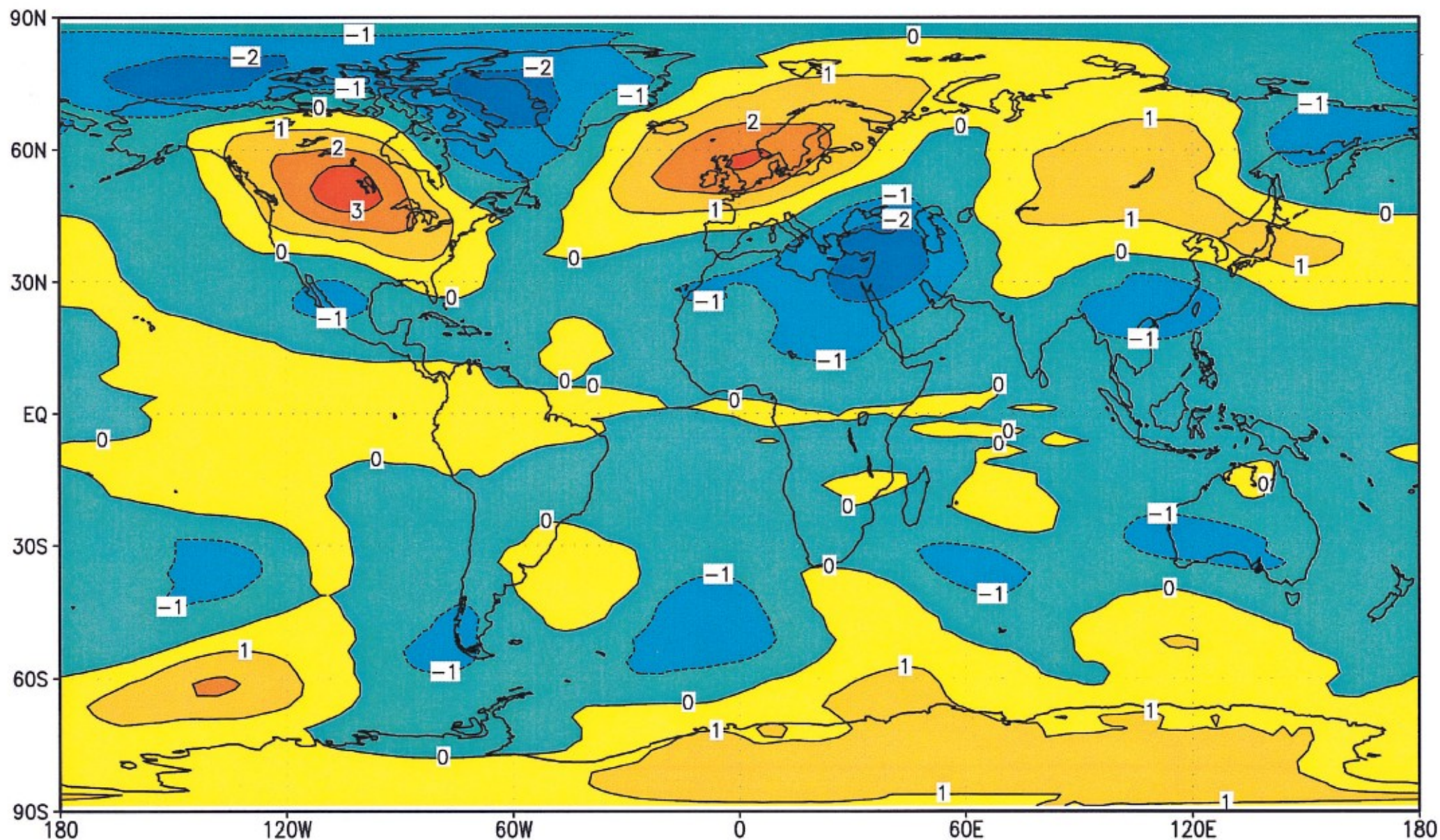
# Eksploracje wulkaniczne ostatnich 2000 lat

Ilość związków siarki z rdzeni lodowych pozwala zrekonstruować wulkanizm ostatnich 2000 lat.

Zwraca uwagę względne minimum podczas MWP (średniowiecze) i maksimum podczas LIA szczególnie lata 1600-1700.



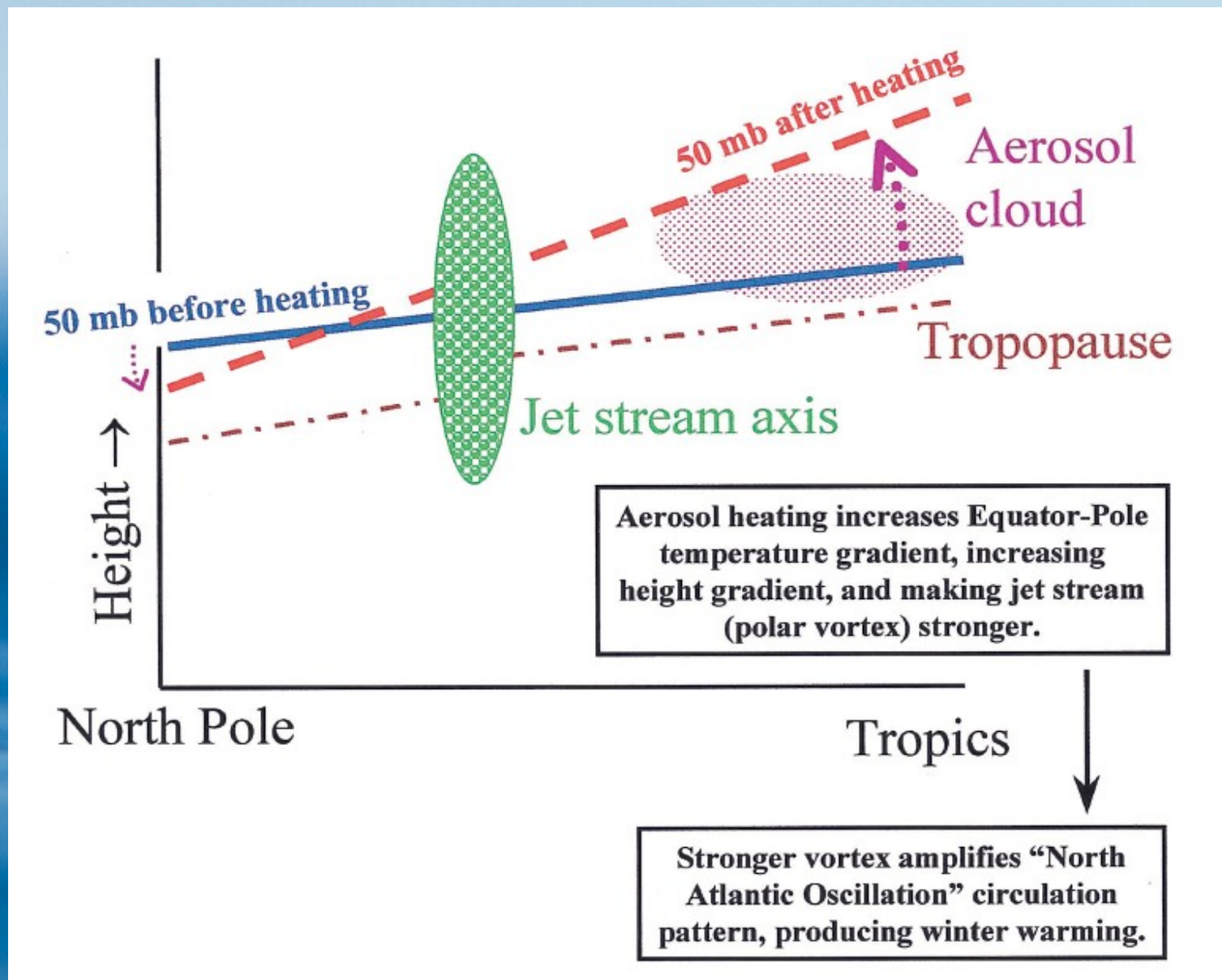
# Anomalie temperatury niższej atmosfery zimą po Pinatubo



Po wybuchu wulkanów tropikalnego pierwsza zima typowo jest ciepła m. in. w Pn. Europie a zimny na Bliskim Wschodzie. Układ ten jest typowy dla dodatniej wartości NAO (patrz następny wykład).

*Robock 2000*

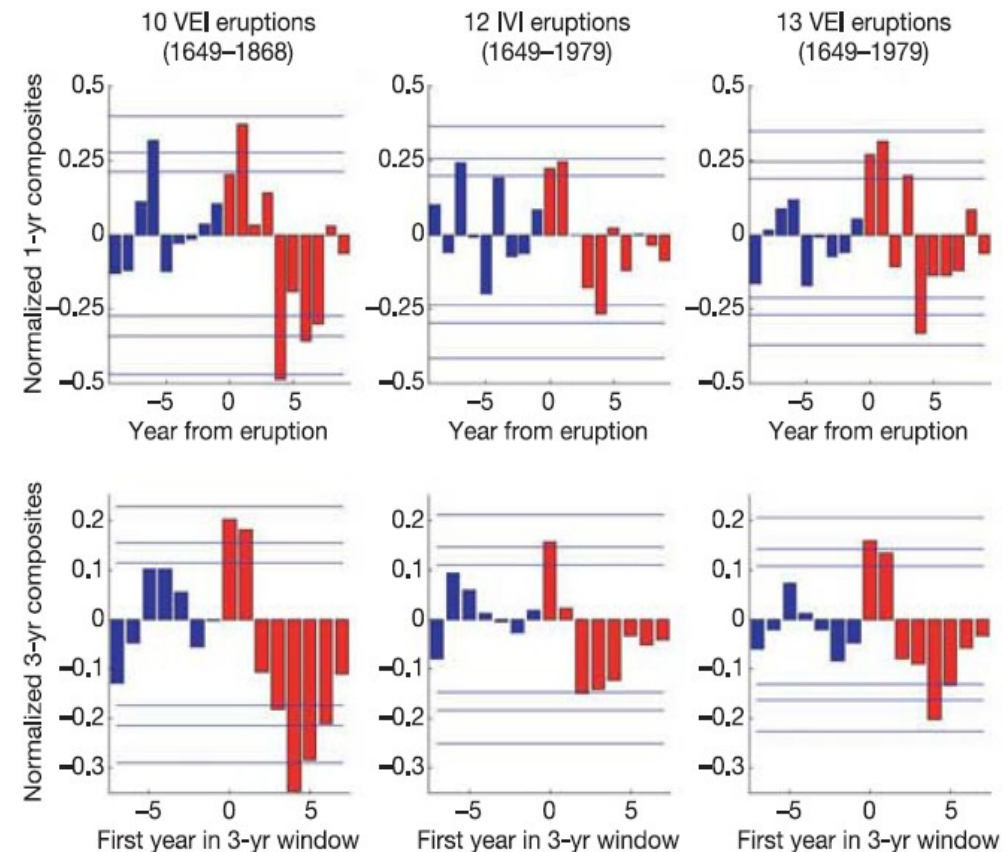
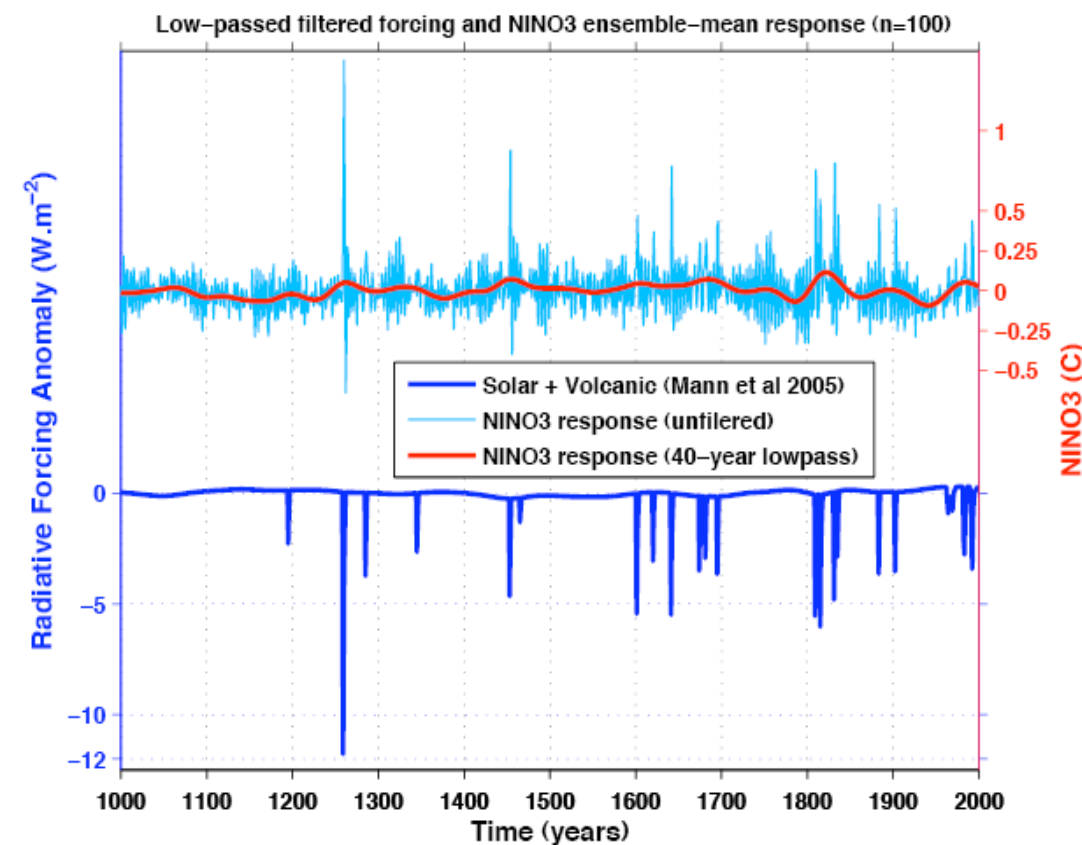
# Mechanizm zimowej anomalii powulkanicznej



Ogrzewania tropikalnej stratosfery zwiększa planetarny gradient temperatur wzmacniając „wir okołobiegunowy” (jego intensywność jest w praktyce inną definicją NAO)

*Robock 2000*

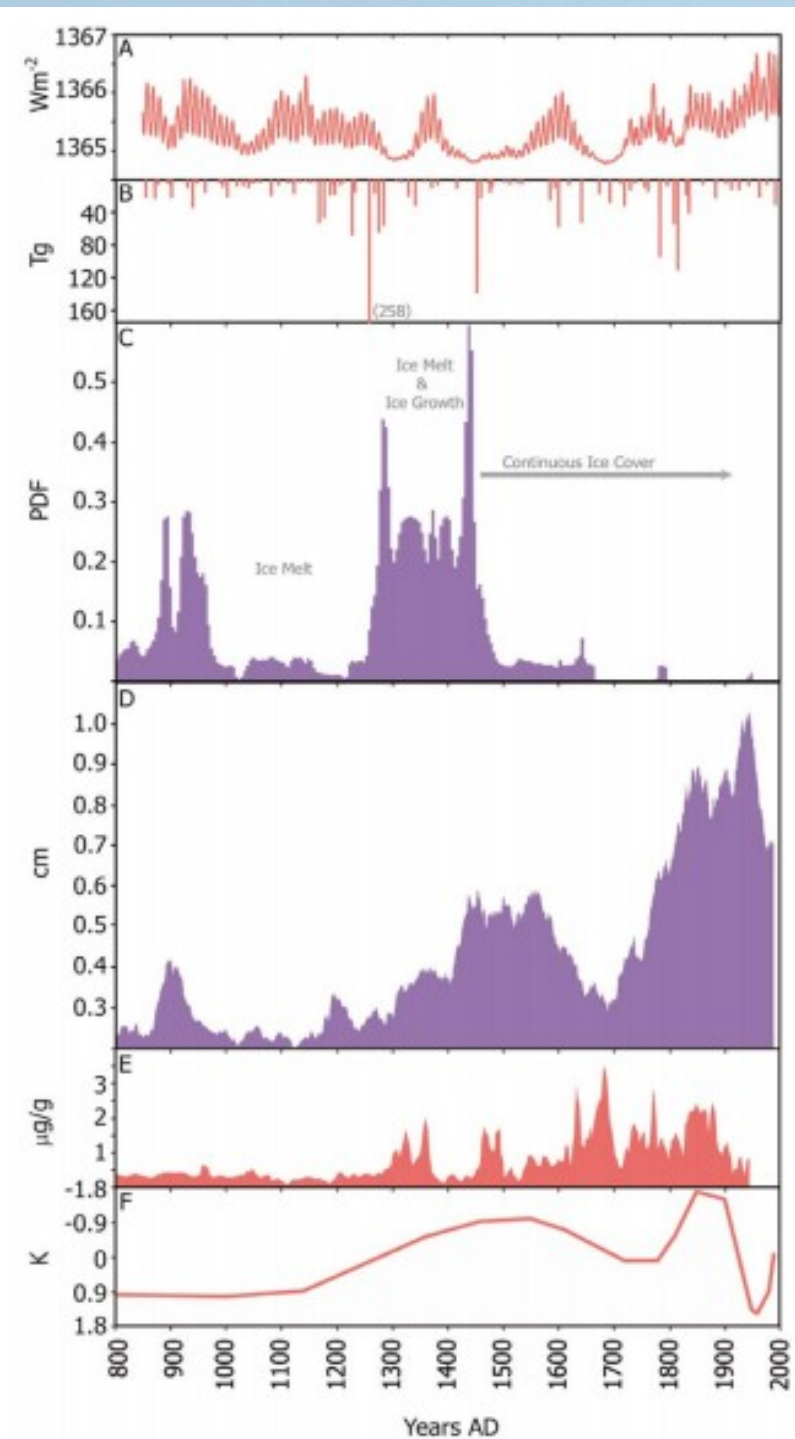
# Czy wybuchy tropikalnych wulkanów wywołują El Niño?



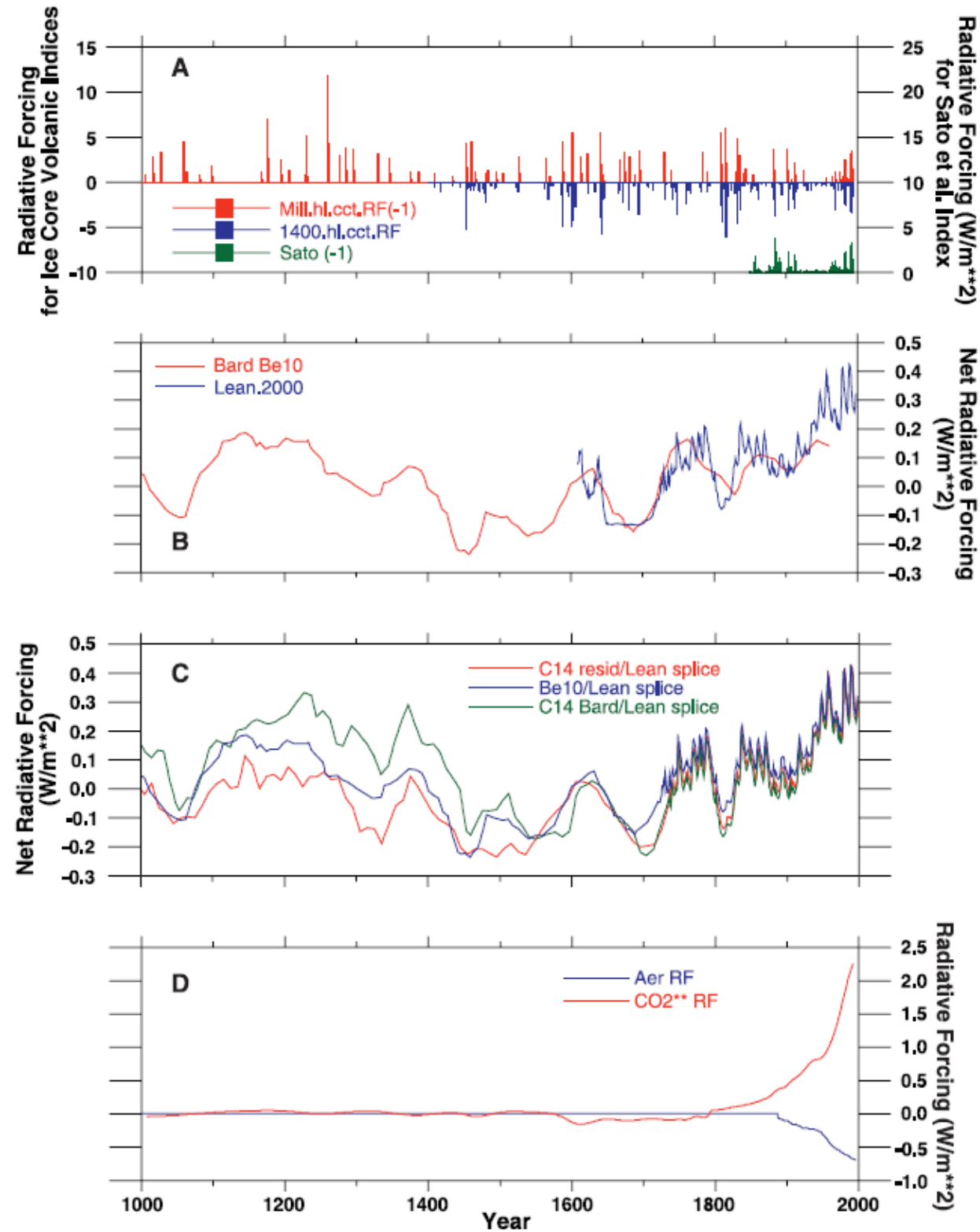
Natychmiast po wielkich eksplozjach wulkanów tropikalnych (1258; Tambora 1815; Krakatau 1883; Pinatubo 1991) rozpoczynało się El Niño. Przypadek? Przynajmniej niektóre modele klimatyczne pokazują występowanie dodatnich wartości indeksów El Niño po eksplozjach wulkanów tropikalnych

*Adams Mannd Ammannn 2003; Emilie-Geay et al. 2006*

# Czy wybuchy wulkanów rozpoczęły LIA?



(a) Total solar irradiance (VSK [Schmidt et al., 2011]). (b) Global stratospheric sulfate aerosol loadings [Gao et al., 2008]. (c) Ice cap expansion dates based on a composite of 94 Arctic Canada calibrated <sup>14</sup>C PDFs. (d) 30-year running mean varve thickness in Hvítárvatn sediment core HVT03-2 [Larsen et al., 2011]. (e) Arctic Ocean sea ice recorded in a sediment core on the north Iceland shelf [Massé et al., 2008]; heavy sea ice years correlate with anomalously cold summers across Iceland. (f) Temperature anomalies over southern Greenland (wrt 1881–1980 AD mean) from the borehole temperature inversion at DYE-3 [Dahl-Jensen et al., 1998].

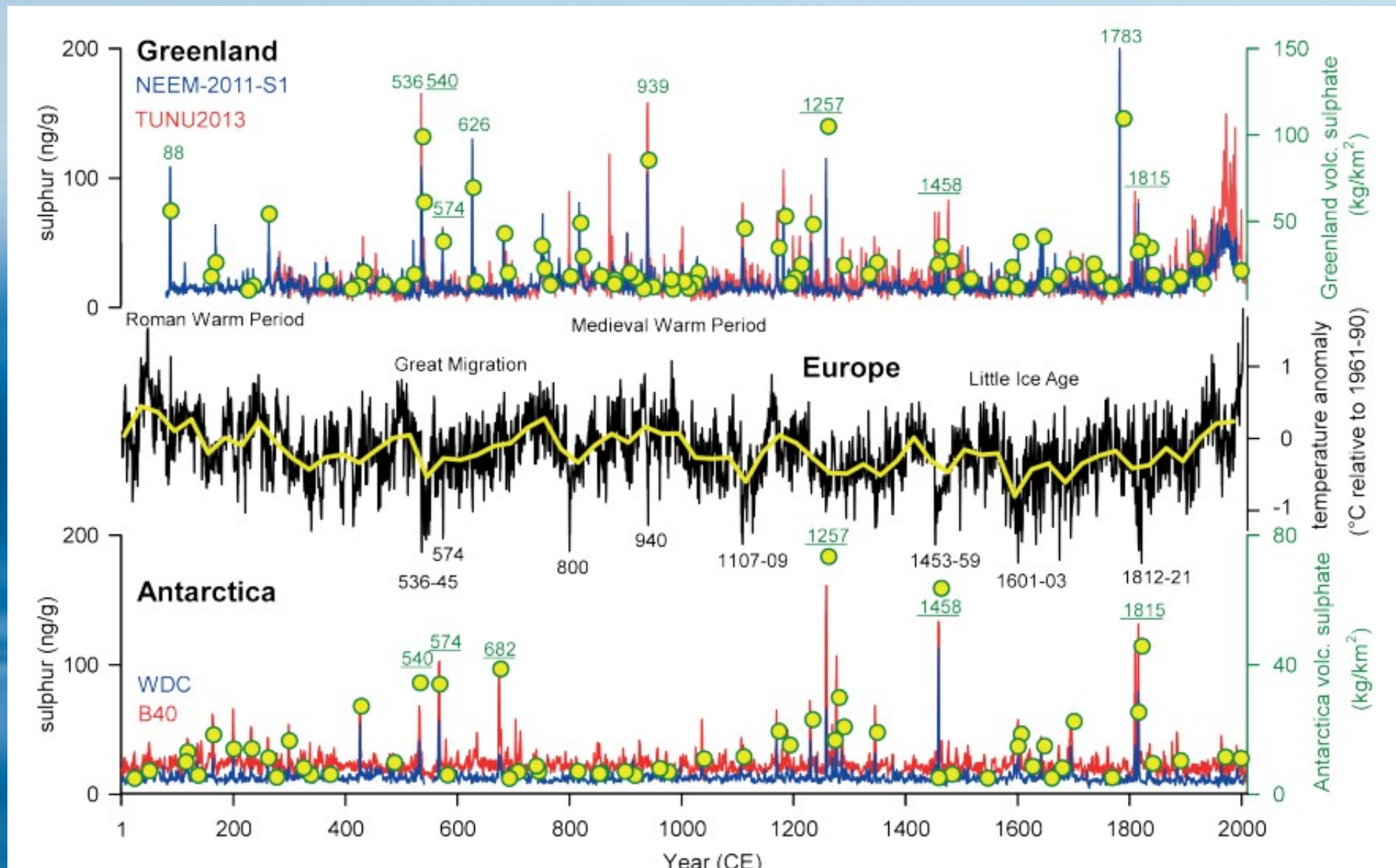


## Co “wymuszało” klimat ostatniego tysiąclecia?

- A)** Trzy rekonstrukcje wymuszania wulkanicznego (czerwona linia odwrócona),
- B)** Rekonstrukcje wymuszania słonecznego z ilości plam na słońcu (niebieskie) i koncentracji izotopu berylu <sup>10</sup>Be (czerwone),
- C)** Trzy rekonstrukcje wymuszania słonecznego z koncentracji <sup>10</sup>Be i <sup>14</sup>C,
- D)** Dopiero od XIX wieku zaczynają dominować czynniki antropogeniczne: gazy cieplarniane (CO<sub>2</sub> – czerwone) i aerozol (niebieskie).

*Crowey 2000 (Science)*

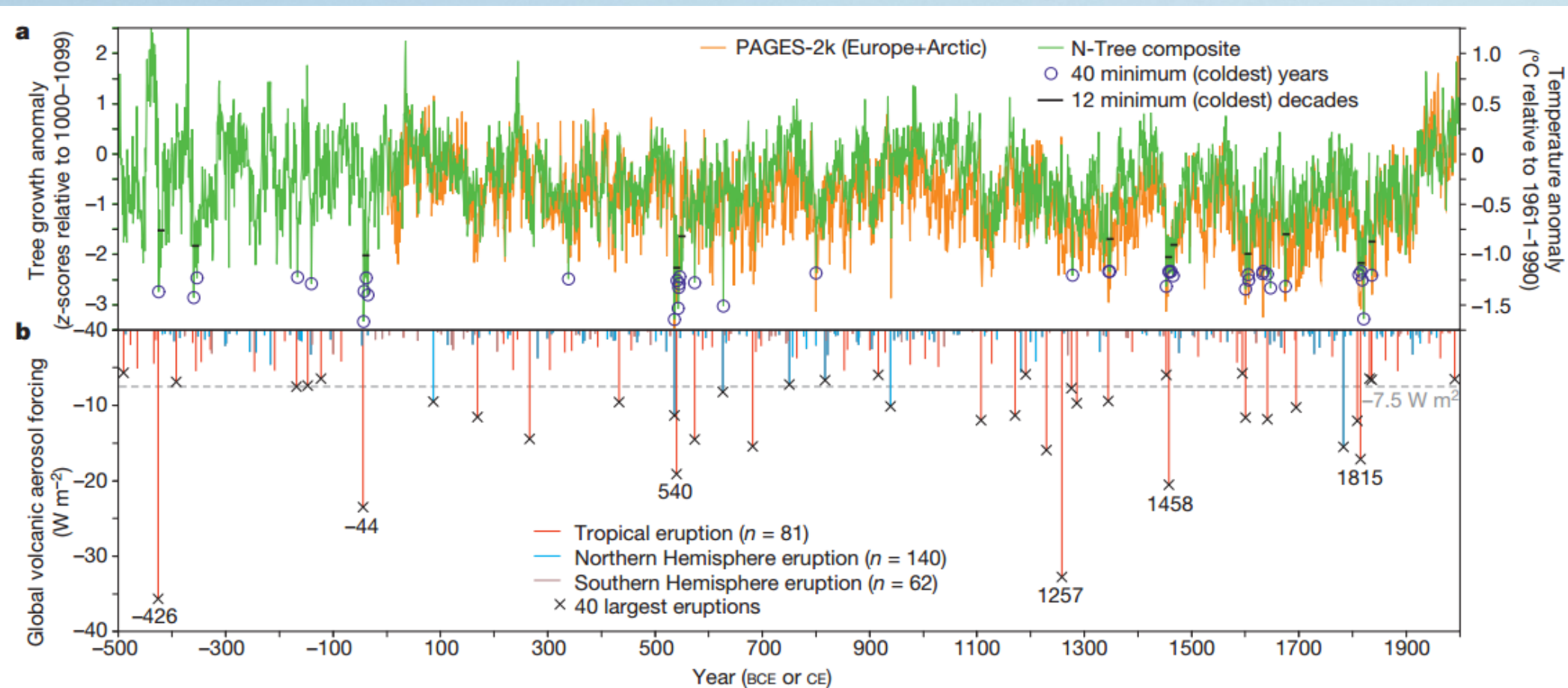
# Największe wulkany obu półkul i temperatura Europy Naszej Ery



Największe źródła siarki w rdzeniach lodowych obu półkul oraz temperatura Europy. Jedynie wulkany tropikalne oddziałują na obie półkule.

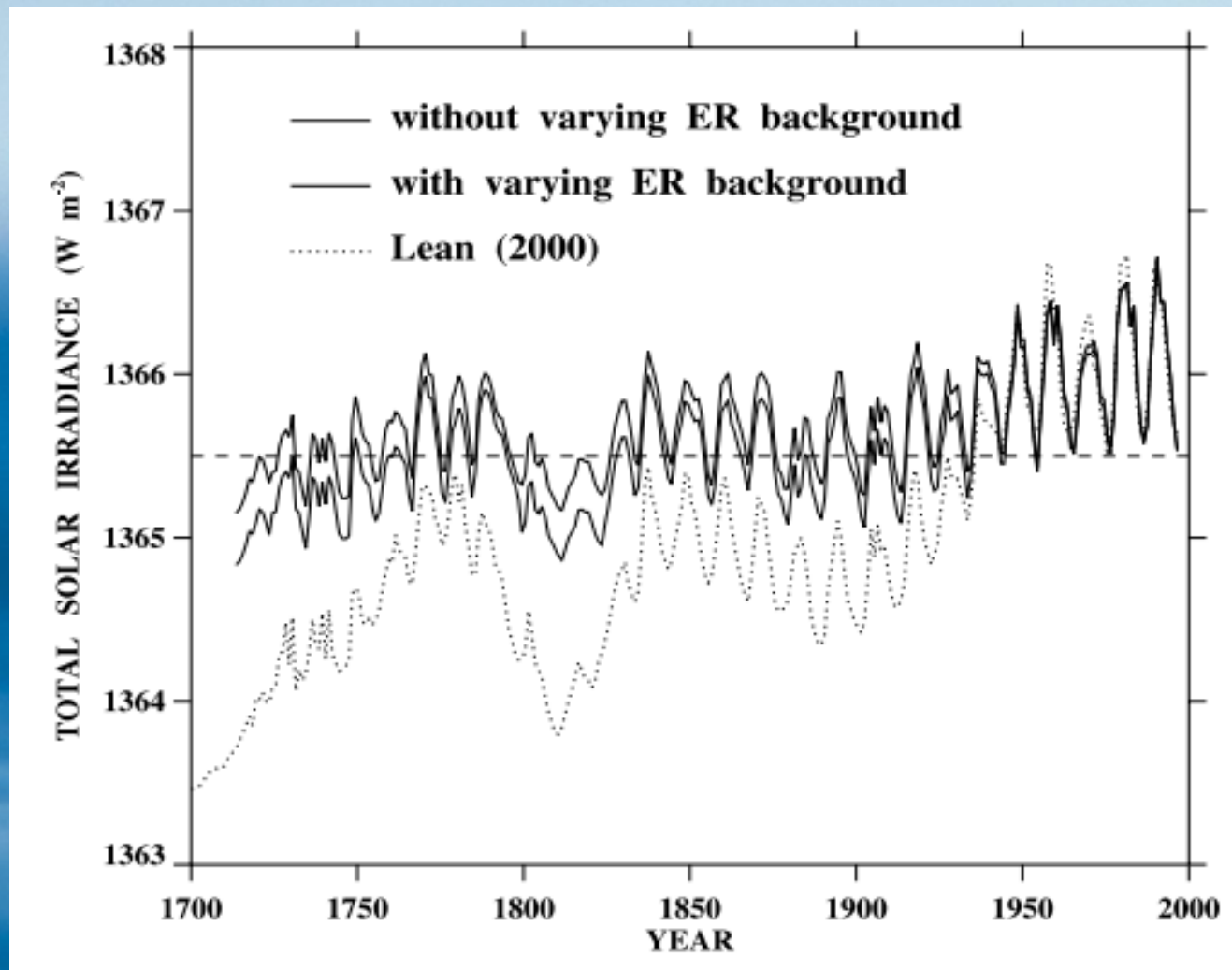
*Sigl et al 2015 (Past Global Channges)*

# Praktycznie wszystkie najzimniejsze lata i dekady ostatnich 2500 lat spowodowane były wybuchami wulkanów



Nowe ulepszone datowania warstw popiołu wulkanicznego w rdzeniach lodowych i słoje drzew pozwoliło na stwierdzenie, że prawie wszystkie najzimniejsze lata i dekady ostatnich 2500 lat związane były z dużymi wybuchami wulkanów tropikalnych lub z północnej półkuli. *Sigl et al 2015 (Nature)*

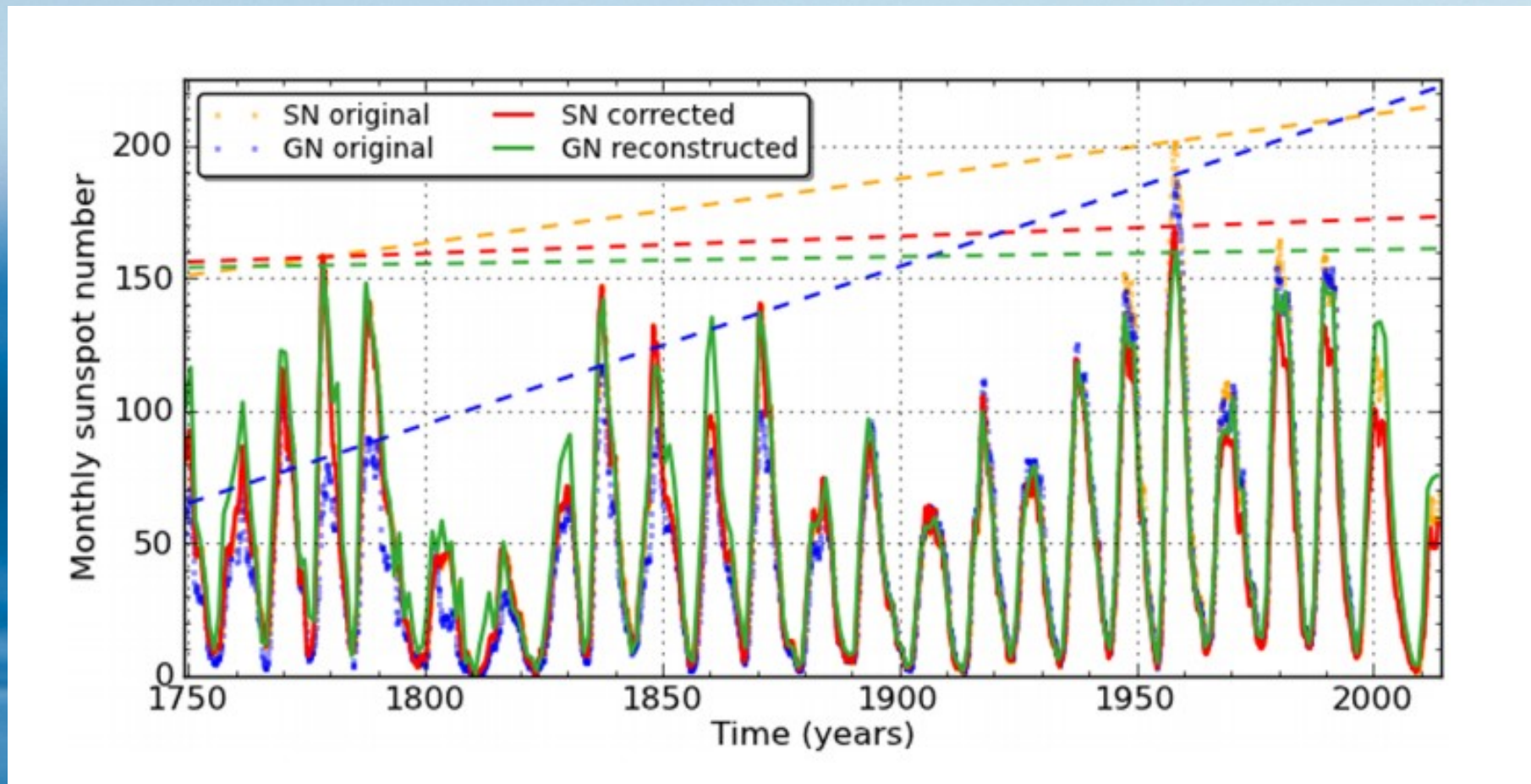
## Ale czy nie przeceniamy znaczenia zmienności jasności słońca w skali setek lat? 1/2



Niedawne rekonstrukcje jasności Słońca oparte o model pola magnetycznego słońca oraz dane izotopowe i o aktywności geomagnetycznej wskazują na znacznie mniejsze jej zmiany w ciągu ostatnich stuleci niż wcześniejsze rekonstrukcje oparte o liczbę plam na słońcu (kropkowane).

*Wang, Lean & Sheeley 2005 (The Astrophysical Journal)*

## Ale czy nie przeceniamy znaczenia zmienności jasności słońca w skali setek lat? 2/2



Ostatnio zakwestionowano też historyczne liczby plam słonecznych (SN) oraz ich grup (GN). Reanaliza oryginalnych zapisów pozwoliła skorygować serię historyczną. Dla klarowności rysunku dodano linie łączące największe wartości z czasów wczesnych pomiarów i XX wiecznych (czerwone i zielone to nowa seria).

*Clette et al 2014 (Space Sci. Rev.)*

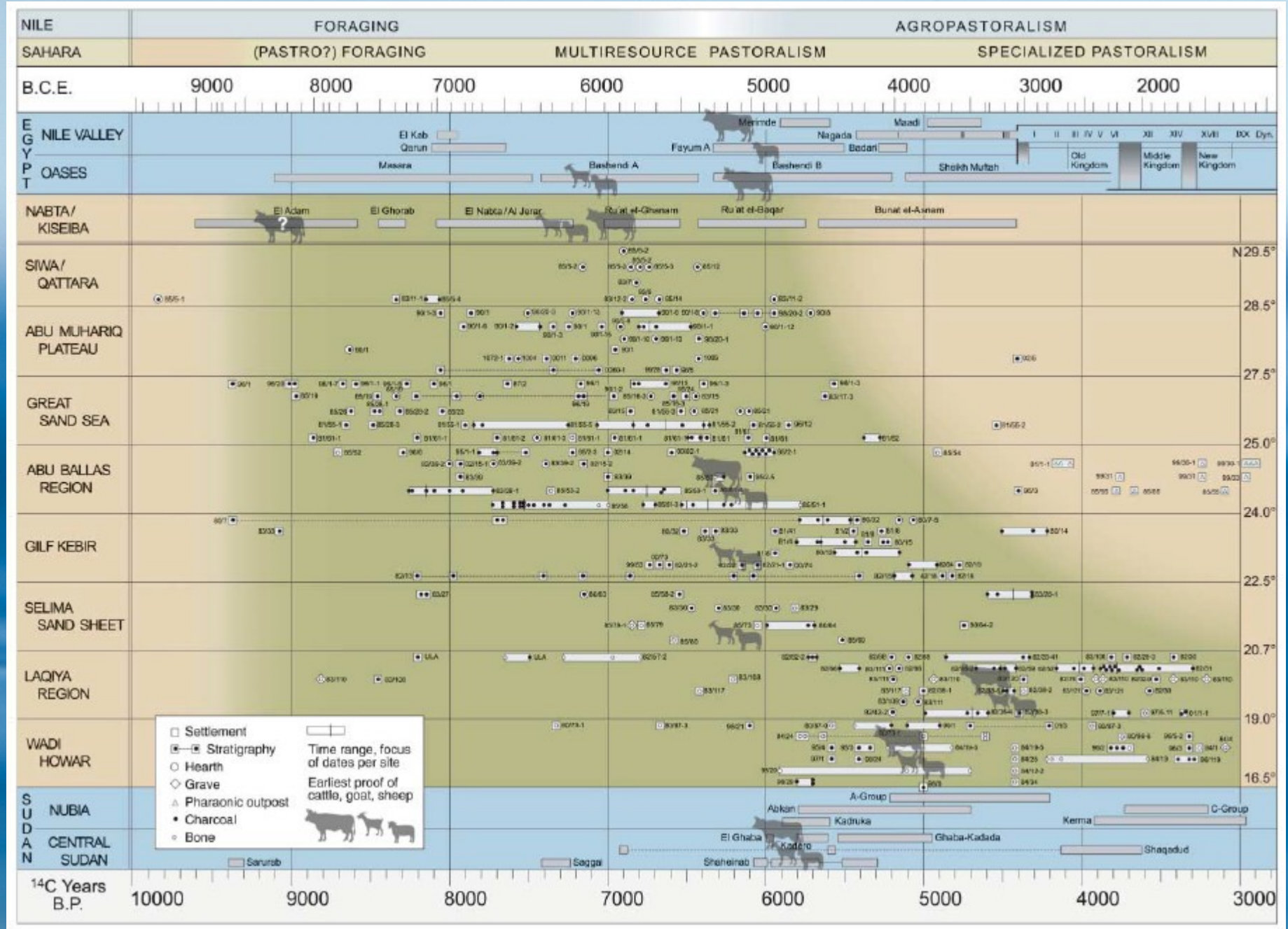
## Podsumowanie 2/3



*Sir Henry Raeburn, "Revd Dr Robert Walker skating on Duddingston Loch" (ok. 1795) – Mała Epoka Lodowa w okolicach Edynburga w Szkocji*

- W ostatnim tysiącleciu (do roku 1900) trwała tendencja oziębiania się Ziemi, szczególnie półkuli północnej związana ze zmianami orbitalnymi.
- W tym trendzie był wyjątek: Ciepły Okres Średniowieczny (lata ok. 900-1300) oraz lokalne minimum: Mała Epoka Lodowa (lata ok. 1600-1900, w innej definicji od 1350 r.)
- Ciepły Okres Średniowieczny był okresem wysokiej aktywności słońca i małego wulkanizmu – obie przyczyny sprzyjały ociepleniu (wpływ Słońca był jednak silniejszy).
- Mała Epoka Lodowa to okres małej aktywności słonecznej (minimum Maundera) i wzmożonego wulkanizmu. Przed jej końcem (spowodowanym spalaniem paliw kopalnych) północna półkula była bliska początku epoki lodowej.

# Niegdysiejsza zielona Sahara

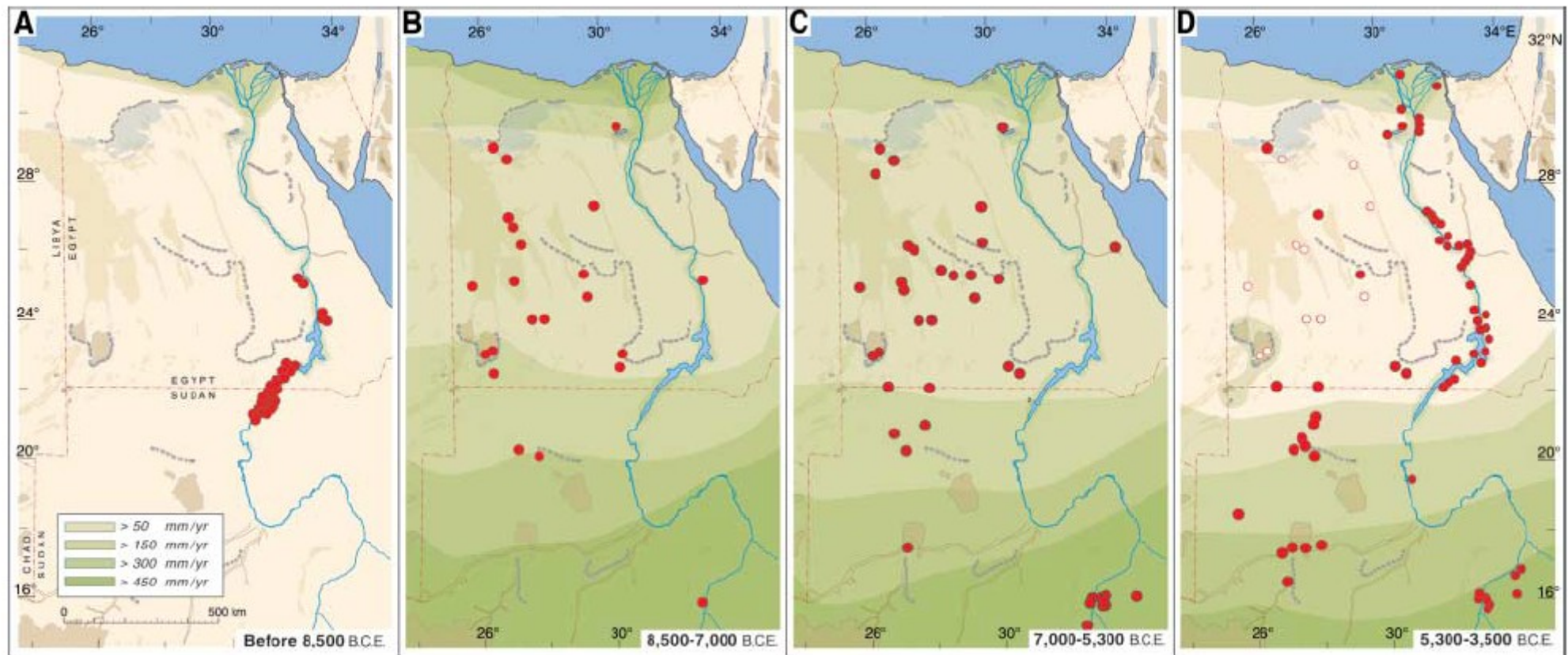


W czasie holocenijskiego optimum klimatycznego Sahara była sawanną.

Uwaga: B.C.E = B.C. = p.n.e.

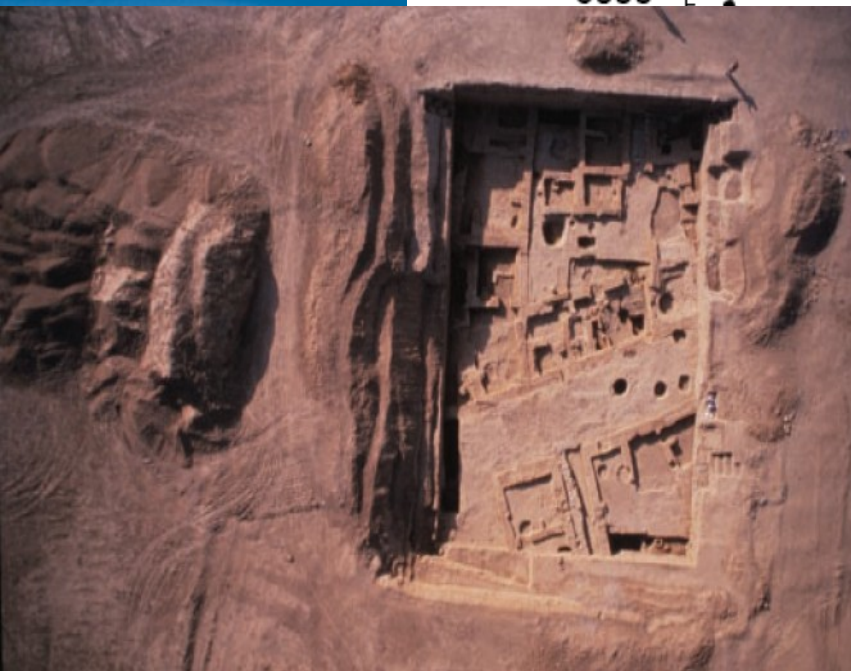
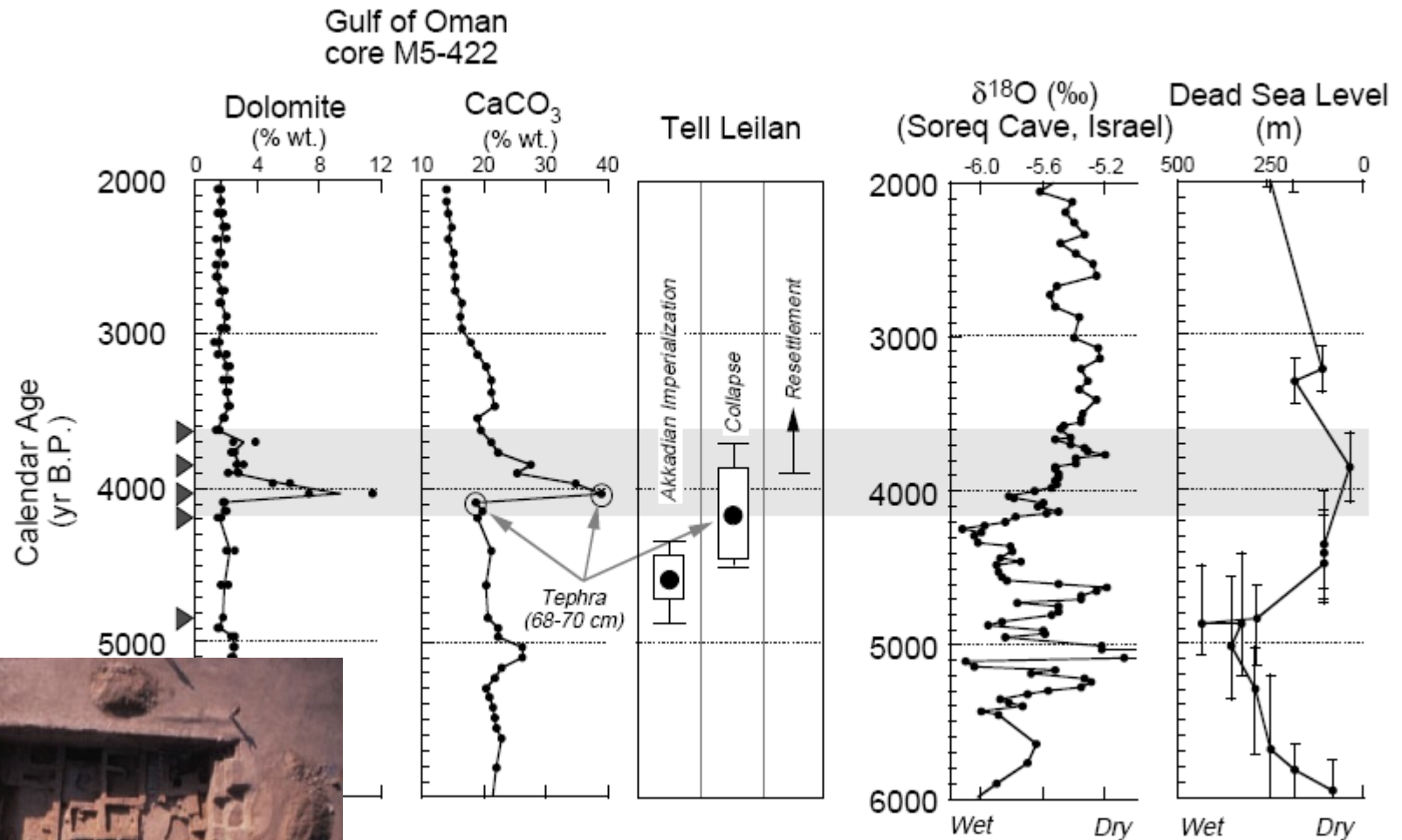
Kruper & Kröpelin 2006 (Science)

# Geografia zasiedlenia Sahary w czasach holocenu



Zmiany klimatu wpłynęły bezpośrednio na rozprzestrzenienie pasterstwa w rejonie dzisiejszej pustyni a następnie, po ponownym wyschnięciu Sahary prawdopodobnie przyspieszyły rozwój rolnictwa w dolinie Nilu.

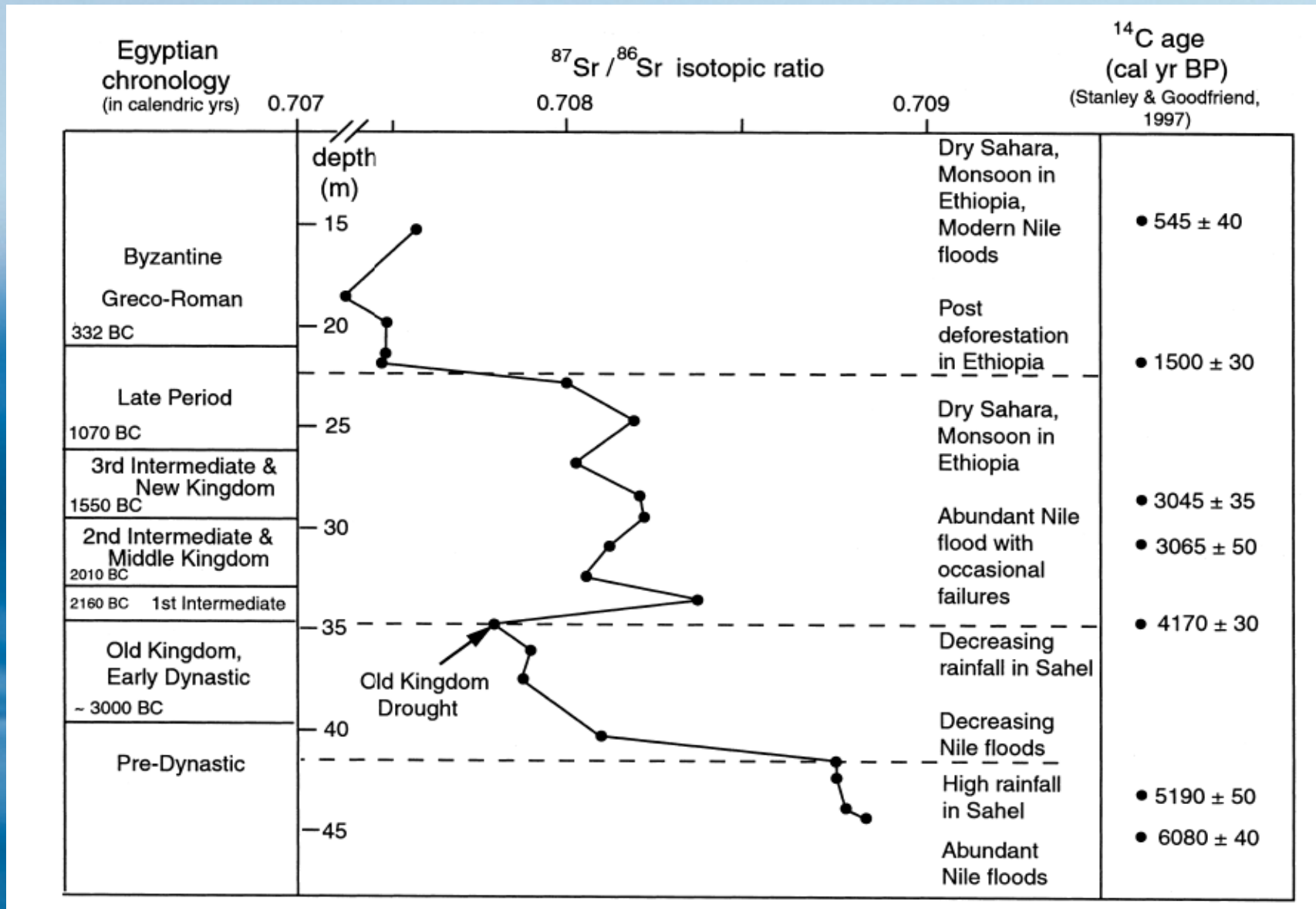
# Upadek królestwa Akadu (4170 lat temu)



Zmiany składu osadów w Zatoce Omańskiej (współ-datowane z ruinami akadyjskimi (po lewej) dzięki warstwie popiołu wulkanicznego (*tephra*) świadczą, że kultura ta upadła w wyniku kilkudziesięcioletniej suszy.

*Cullen et al. 2000 (Geology)*

# W tym samym czasie upada Stare Królestwo w Egipcie



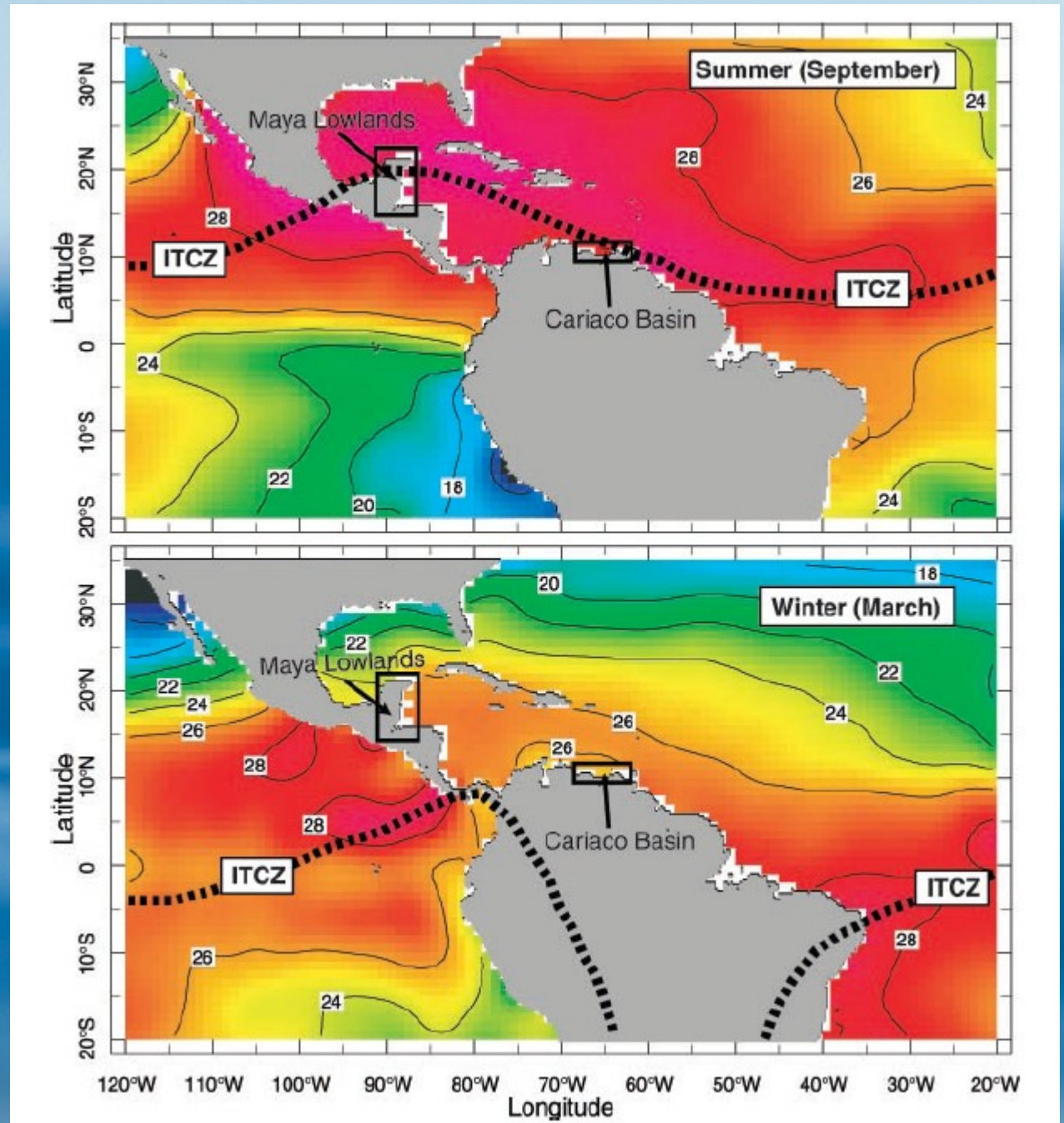
Równocześnie z Akkadem upada Stare Królestwo Egiptu ok. 2160 p.n.e. podczas 30 lat anarchii wywołanej głodem z powodu braku wylewów Nilu. Na rysunku: stosunek izotopów strontu z osadów w delcie Nilu.

*Stanley et al. 2003 (Geoarcheology)*

# Majowie: zakładnicy Tropikalnej Strefy Konwergencji

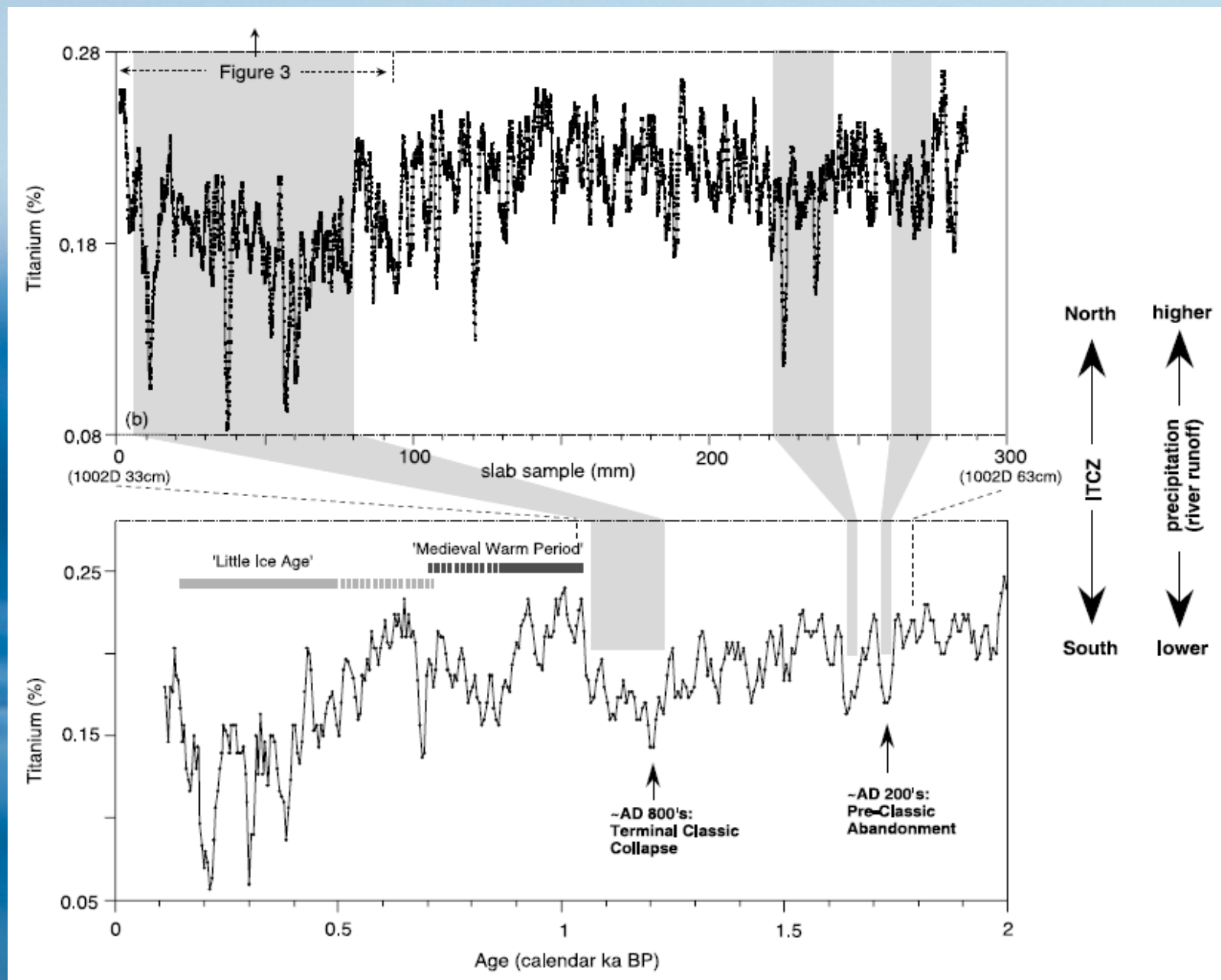
Cywilizacja Majów na mogła prosperować jedynie tak długo jak długo latem Tropikalne Strefa Konwergencji obejmowała Jukatan.

Osady denne Basenu Cariaco stanowią dobre doskonały materiał zastępczy do badania dawnych pozycji ITCZ. Służy do tego koncentracja tytanu w osadzie – miara ilości materiału pochodzenia lądowego (opadów).



*Haug et al. 2003 (Science)*

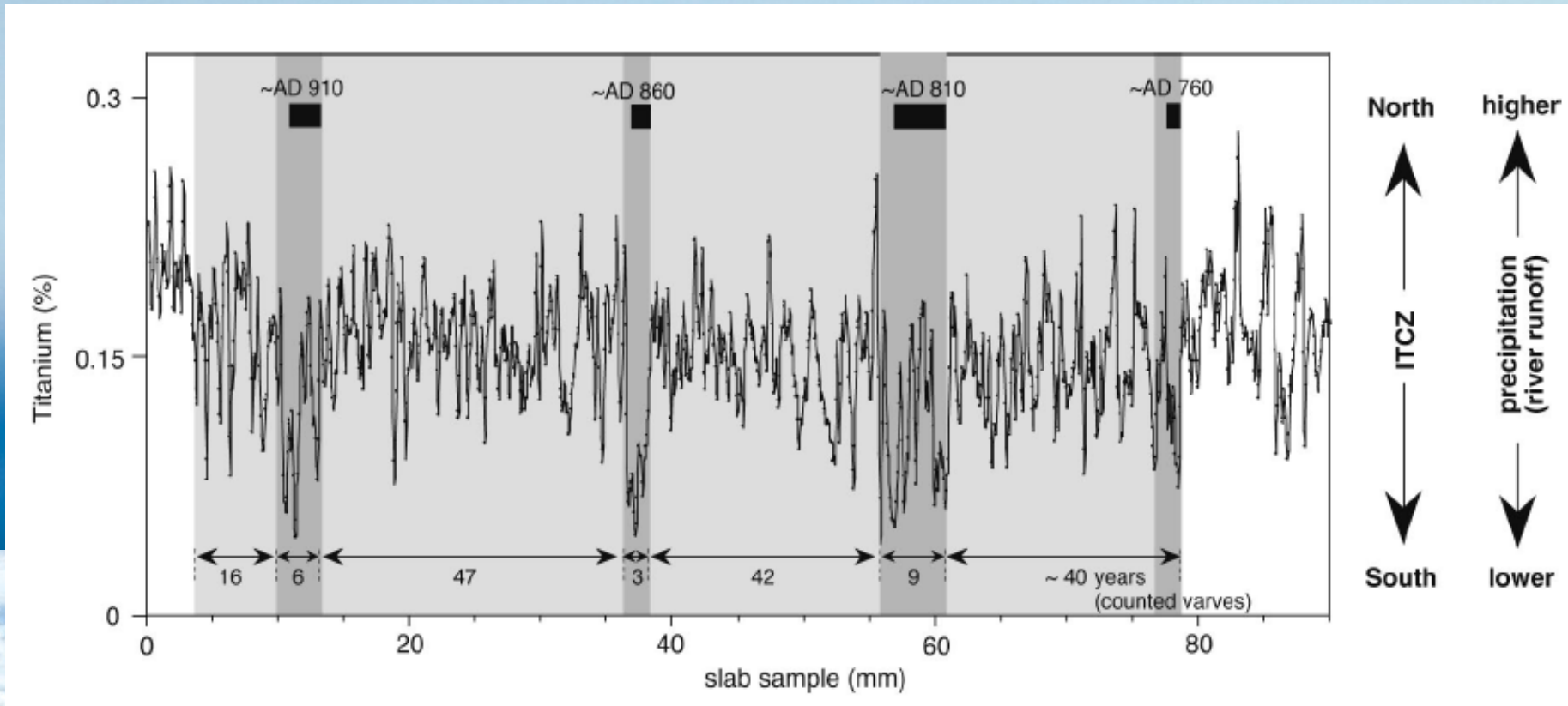
# Upadki cywilizacji Majów – okresy suszy



Upadek pre-klasycznej i klasycznej cywilizacji Majów wiązał się z okresami wieloletnich susz.

*Haug et al. 2003 (Science)*

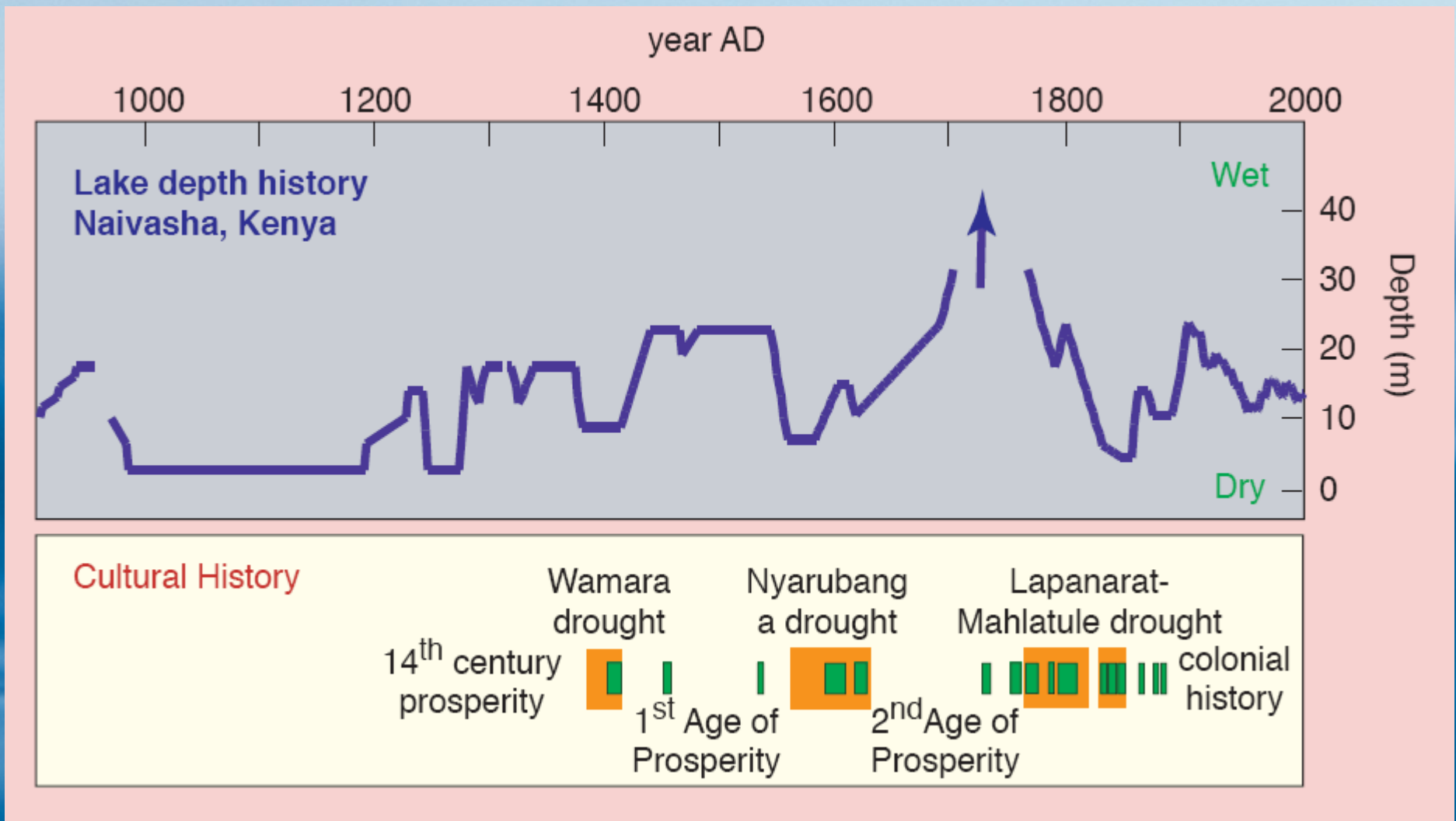
# Ostateczny upadek Majów 760-910 n.e.



Ostatnie daty wykute na pomnikach w różnych miastach Majów skupiają się wokół lat 810, 860 i 910 n.e. Badania paleoklimatyczne tłumaczą to jako 3 okresy suszy (datowanej dzięki liczeniu warw), odpowiednio 9, 3 i 6 letniej. Majowie nie mieli szczęścia: zaraz po upadku ich ostatnich miast klimat stał się zdecydowanie bardziej wilgotny.

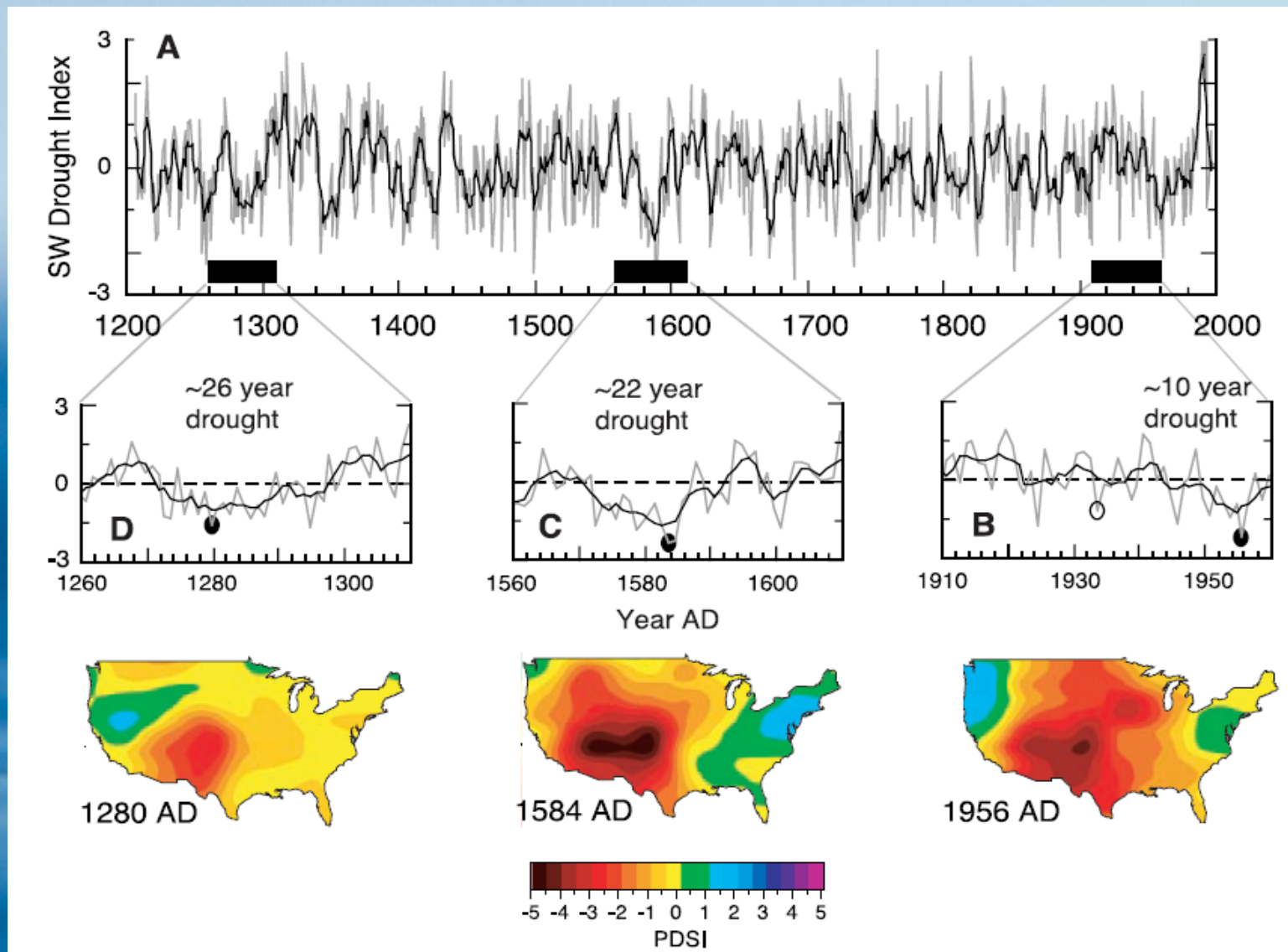
*Haug et al. 2003 (Science)*

# Klimat i historia Wschodniej Afryki



Zapis paleoklimatyczny (głębokość jeziora Naivasha w Kenii) potwierdza usną historię (trzy okresy głodu, wojen i migracji oraz okresy dobrobytu pomiędzy). Suche okresy pokrywają się ze wzmożoną aktywnością Słońca.

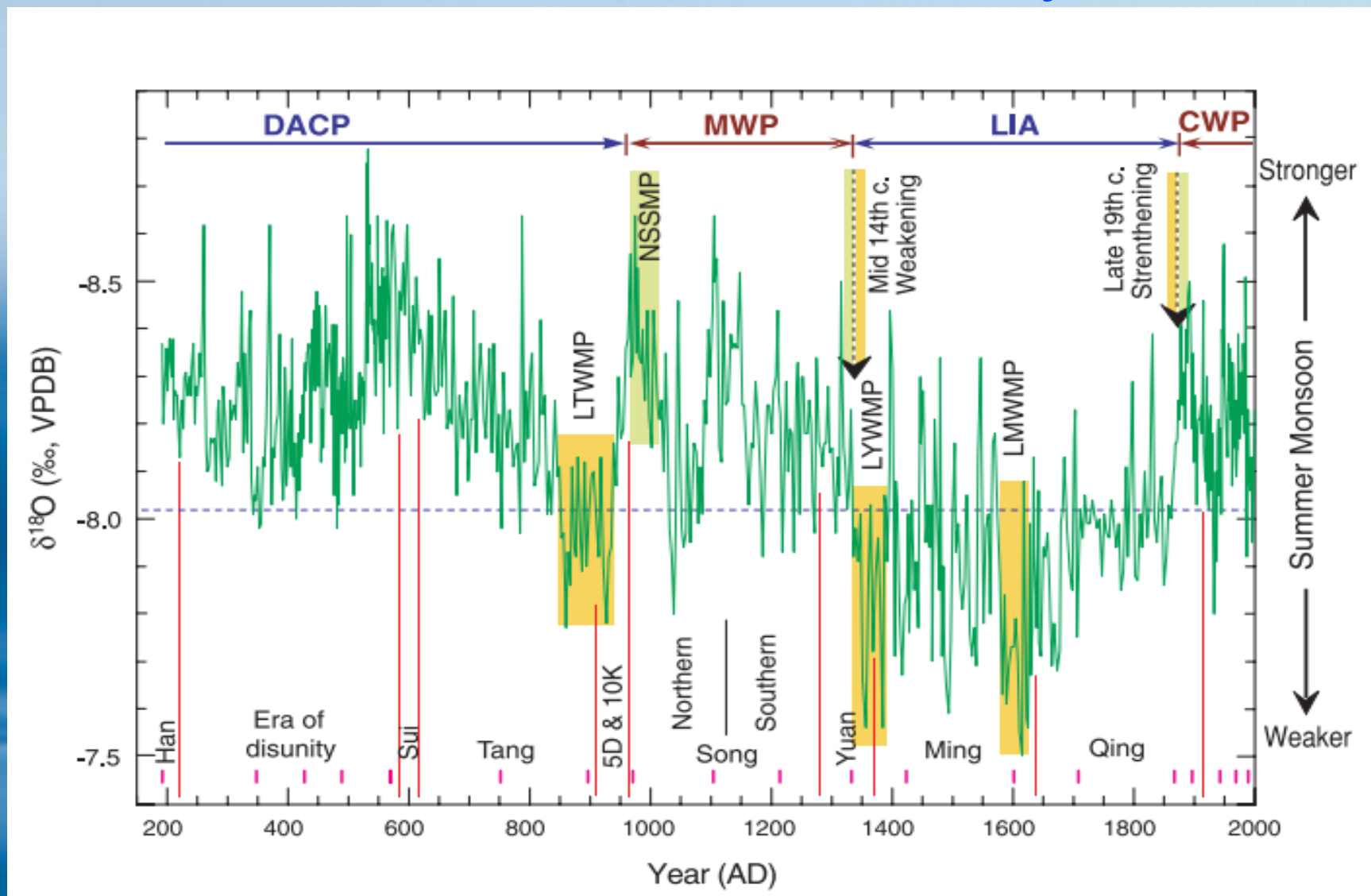
# Susze w Północnej Ameryce



Susza około roku 1260 zniszczyła rolnicze ludy Pueblo, ok 1580 pomogła pokonać pierwszą angielską kolonię w Roanoke (Pn. Karolina), mniejsza susza 1933-38 spustoszyła Oklahomę (*"Grona gniewu"* Steinbacka)

*deMenocal 2001 (Science)*

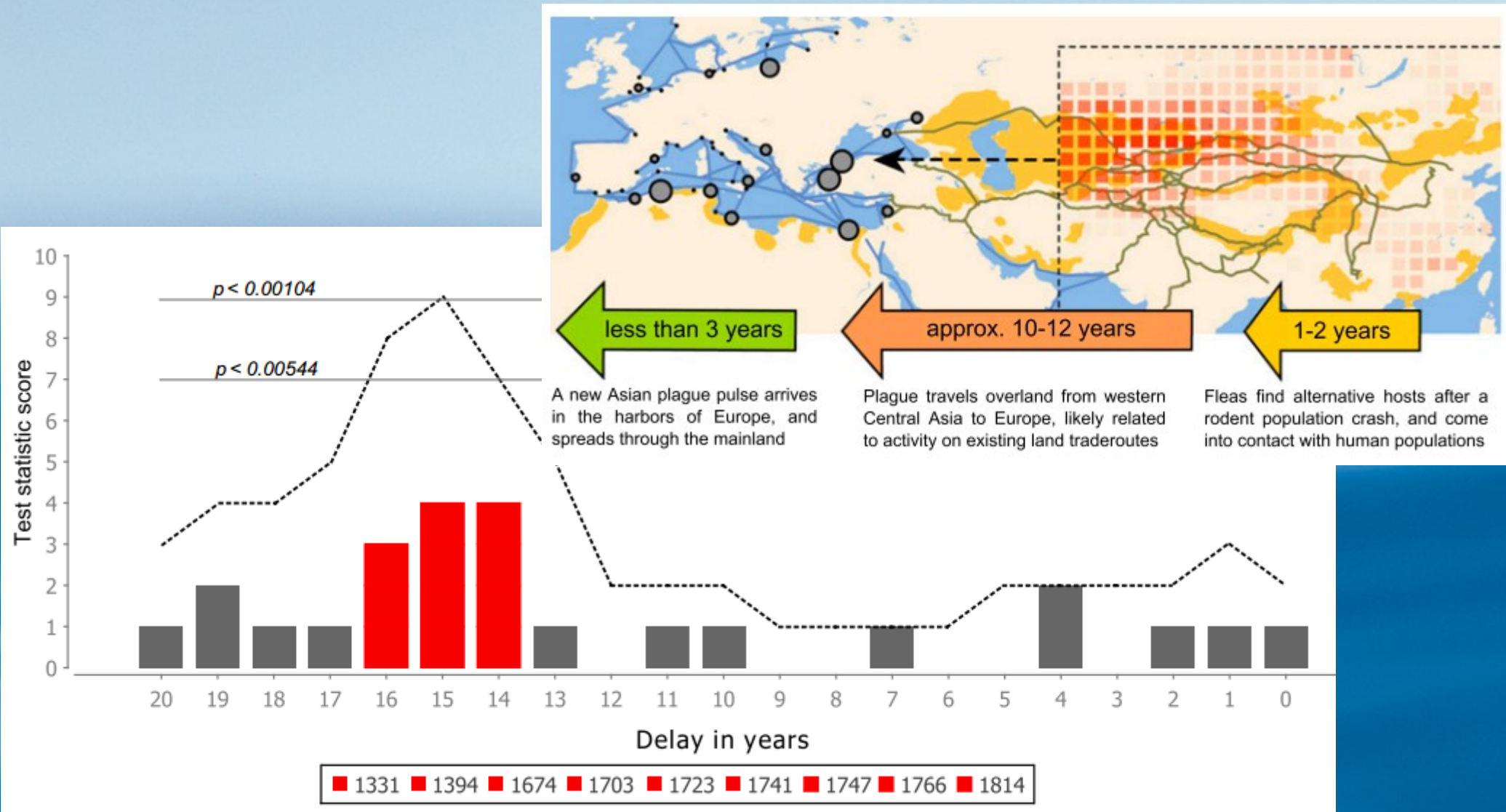
# Susze w Chinach i końce dynastii



Dane izotopowe z jaskini Wanxiang w Chinach (proxy intensywności monsunów letnich) wskazują, że okresy największych susz (słabych monsunów) pokrywają się z okresami niepokojów i upadku dynastii Tang, Song i Ming.

*Zhang et al 2008 (Science)*

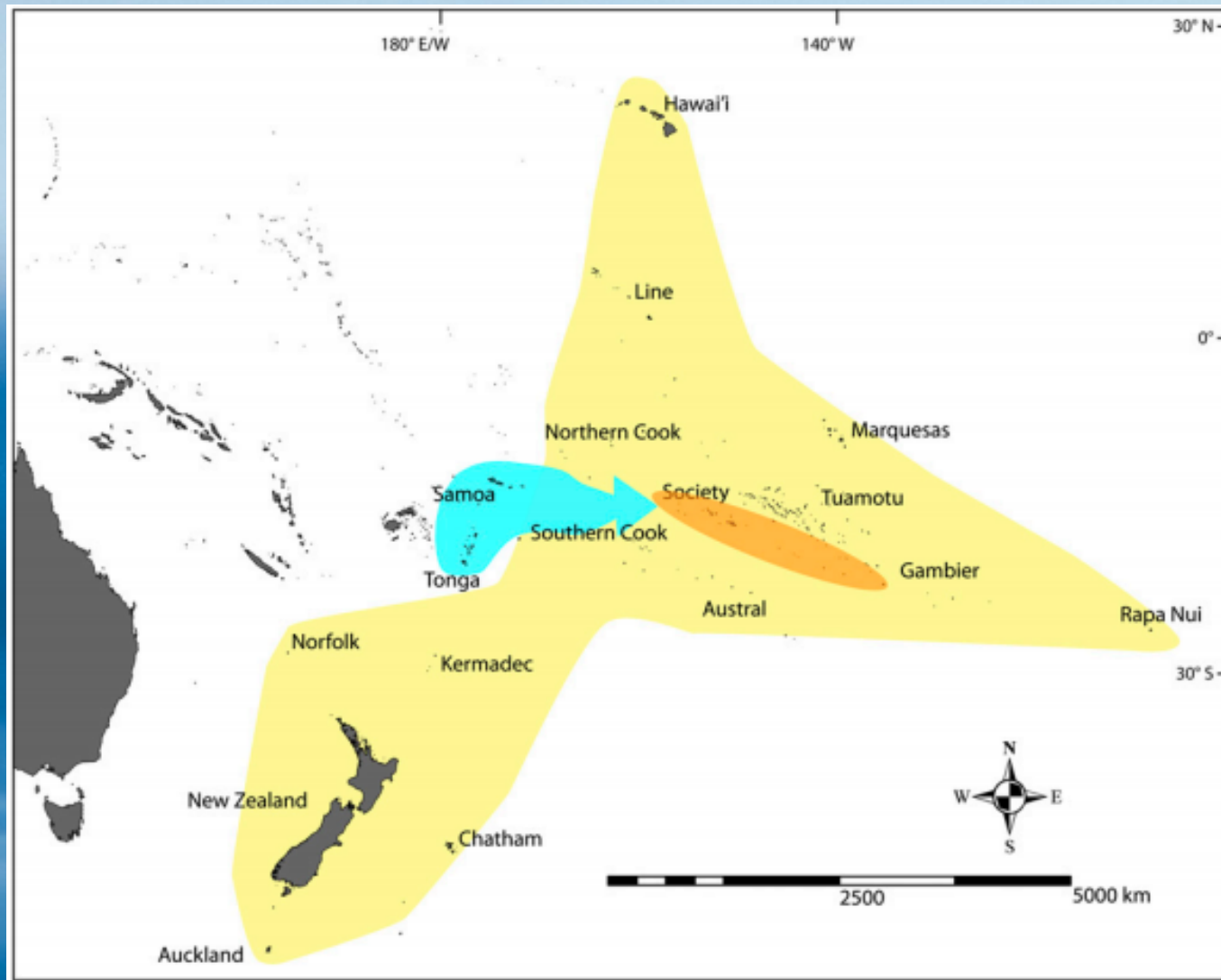
# Susze w Azji Środkowej i Czarna Śmierć



Prawie wszystkie europejskie epidemie dżumy (*Yersinia pestis*) poprzedzone były suszami w Azji Środkowej, najczęściej wcześniejszymi o 14-16 lat (1-2 lata na przejście bakterii ze szczurów na ludzi, 10-12 na przejście Szlaku Jedwabnego i mniej niż 3 na rozprzestrzenienie się w Europie drogą morską.

*Schmid et al 2015 (PNAS)*

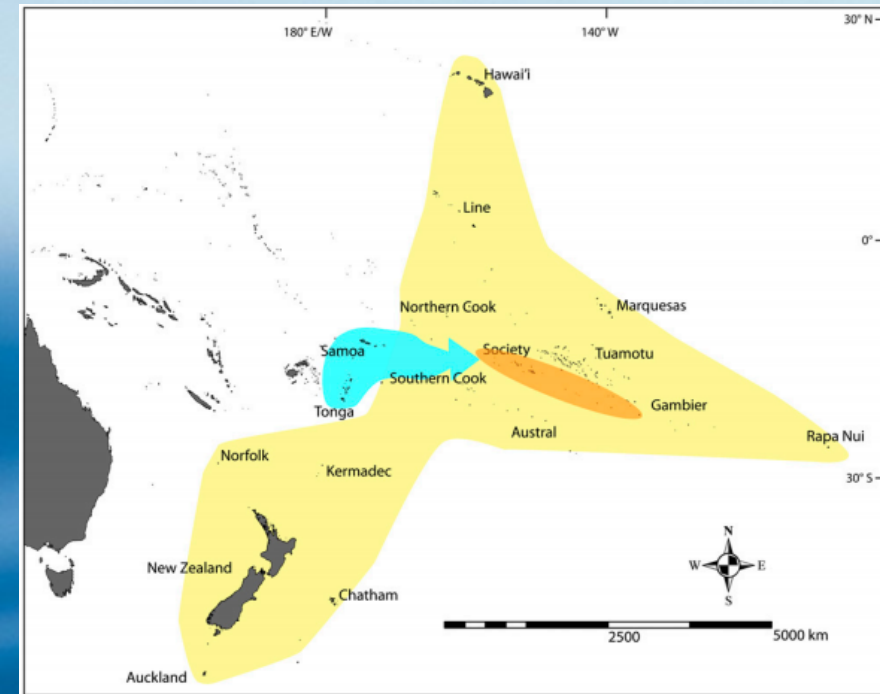
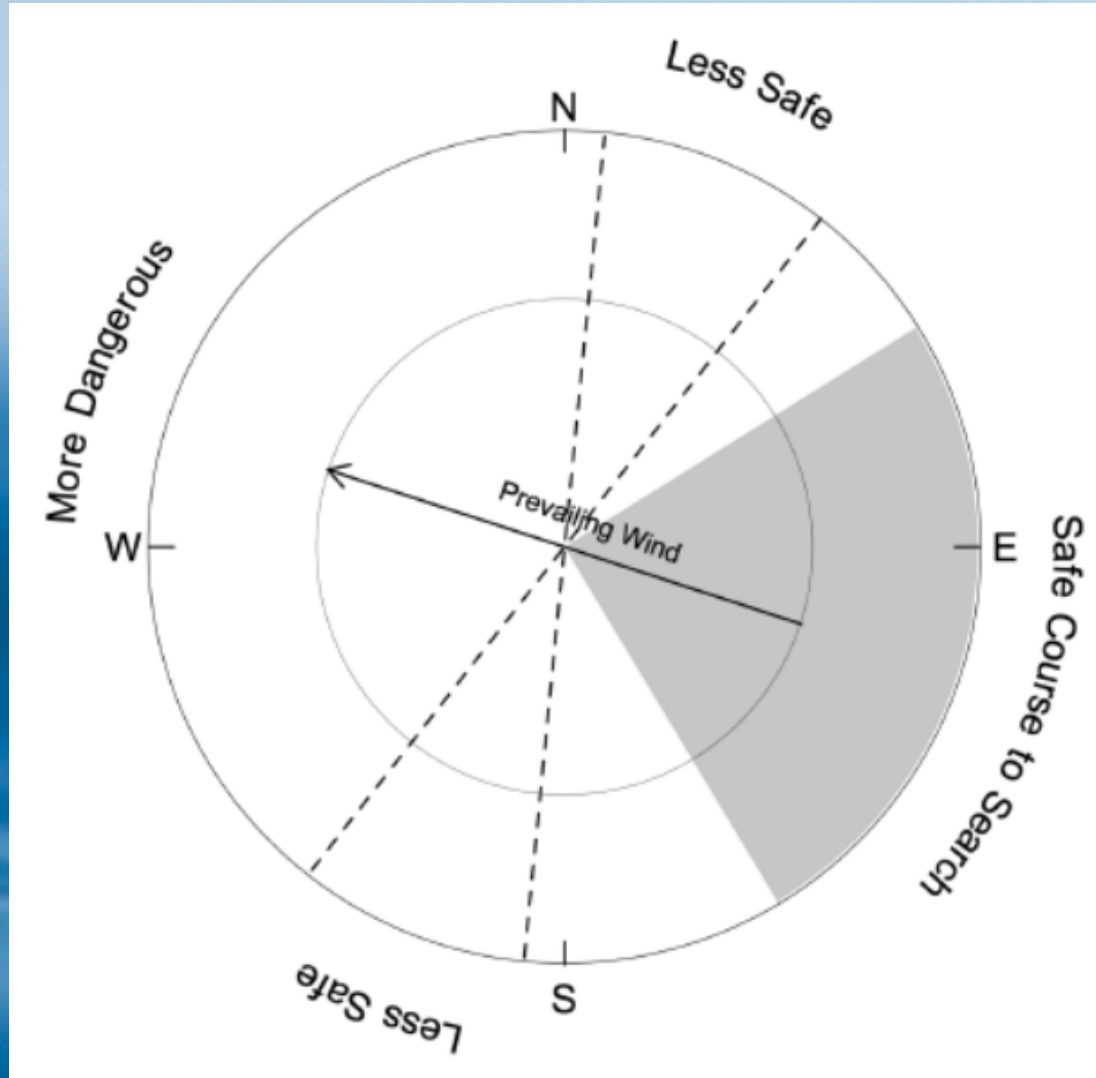
# Ale czy wszystko można wyjaśnić klimatem?



Datowanie najwcześniejszych śladów osadnictwa na wyspach Pacyfiku wskazuje na błyskawiczne rozprzestrzenienie się Polinezyjczyków w okresie Ciepłego Średniowiecza (pomarańczowe 1025-1121 AD i żółte 1200 do 1290 AD). Tylko czy permanentna La Nina pomagała czy przeszkadzała w ekspansji morskiej?

*Wilmhurst et al. 2011 (PNAS)*

# Nie bardzo bo Polinezyjczycy żeglowali pod wiatr



Kolejność odkrywania wysp Polinezji daje się najlepiej wyjaśnić organizowaniem wypraw eksploracyjnych pod wiatr (tak aby móc bezpiecznie wrócić). Najpóźniej odkryto wyspy leżące “w bok” w stosunku do przeważających wiatrów, np. Nową Zelandię.

*Bell et al. 2015 (American Antiquity)*

# Podsumowanie 3/3

Zmiany klimatyczne w holocenie powodowały istotne skutki cywilizacyjne.

- Przesuwanie się Tropikalnej Strefy Konwergencji (ITCZ) pod wpływem różnic nasłonecznienia półkul spowodowało m.in. zazielenienie i ponowne pustynnienie Sahary.
- Zmiany ITCZ związane z aktywnością słoneczną były przyczyną upadku kultur Ameryki Środkowej (Majowie), Afryki Wschodniej czy Chin.
- Istniały też zaburzenia losowe (na pewno?): wieloletnie suszy jakie zniszczyły Stare Królestwo Egiptu i Królestwo Akadu (2150 p.n.e) lub kultury Pueblo (dzisiejsze pd. zach. USA) ok. 1280 n.e.



*Świat zaginiony: rysunek naskalny żyraf, antylop i bydła z centralnej Sahary (Tassili-n-Ajer w Algierii)*

Dziękuję za uwagę

Za tydzień (20.11.2017 r.):

Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (cyrkulacja termohalinowa)



Anthony Casay  
94 ©

*Anthony Casay, 1994*