

Dlaczego Arktyka ociepla się aż tak szybko?
W poszukiwaniu mechanizmów
"amplifikacji arktycznej"

Prof. dr hab. Jacek Piskożub

Instytut Oceanologii PAN w Sopocie

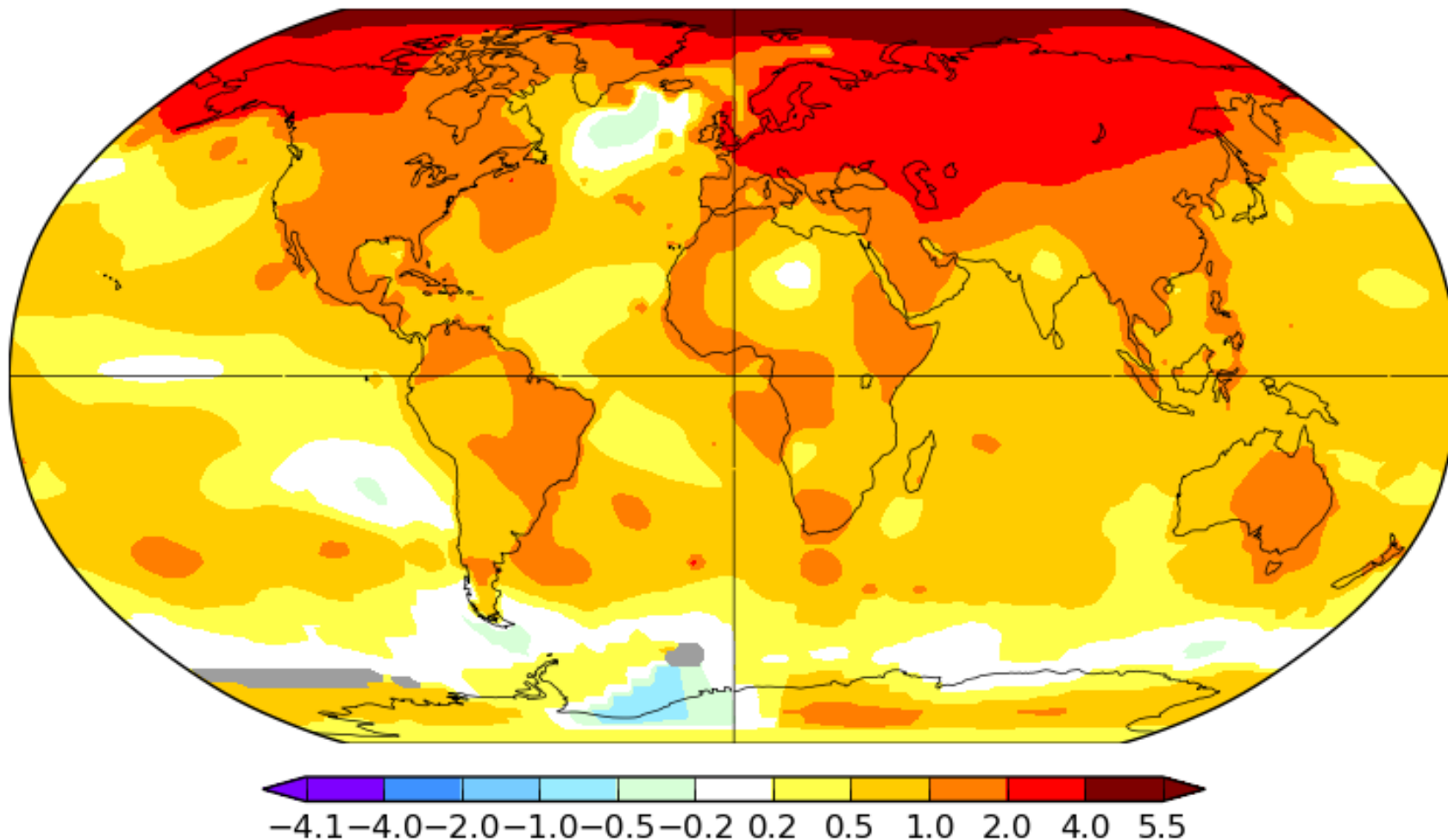
39 Sympozjum Polarne
Sopot, 18-19 maja 2023 r.

Anomalie temperatur zimowych

Dec-Jan-Feb 2013-2022

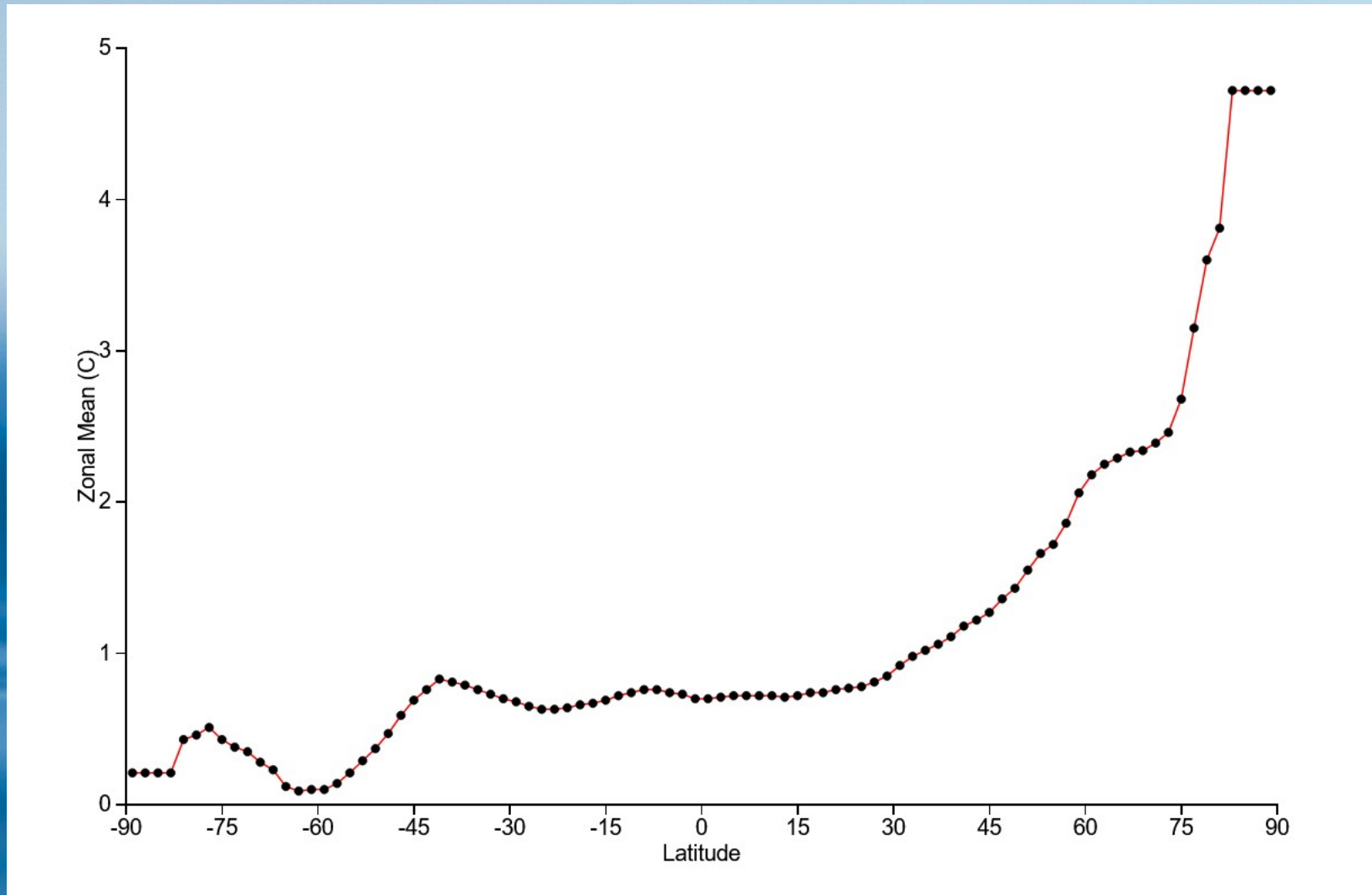
L-OTI(°C) Anomaly vs 1951-1980

0.90



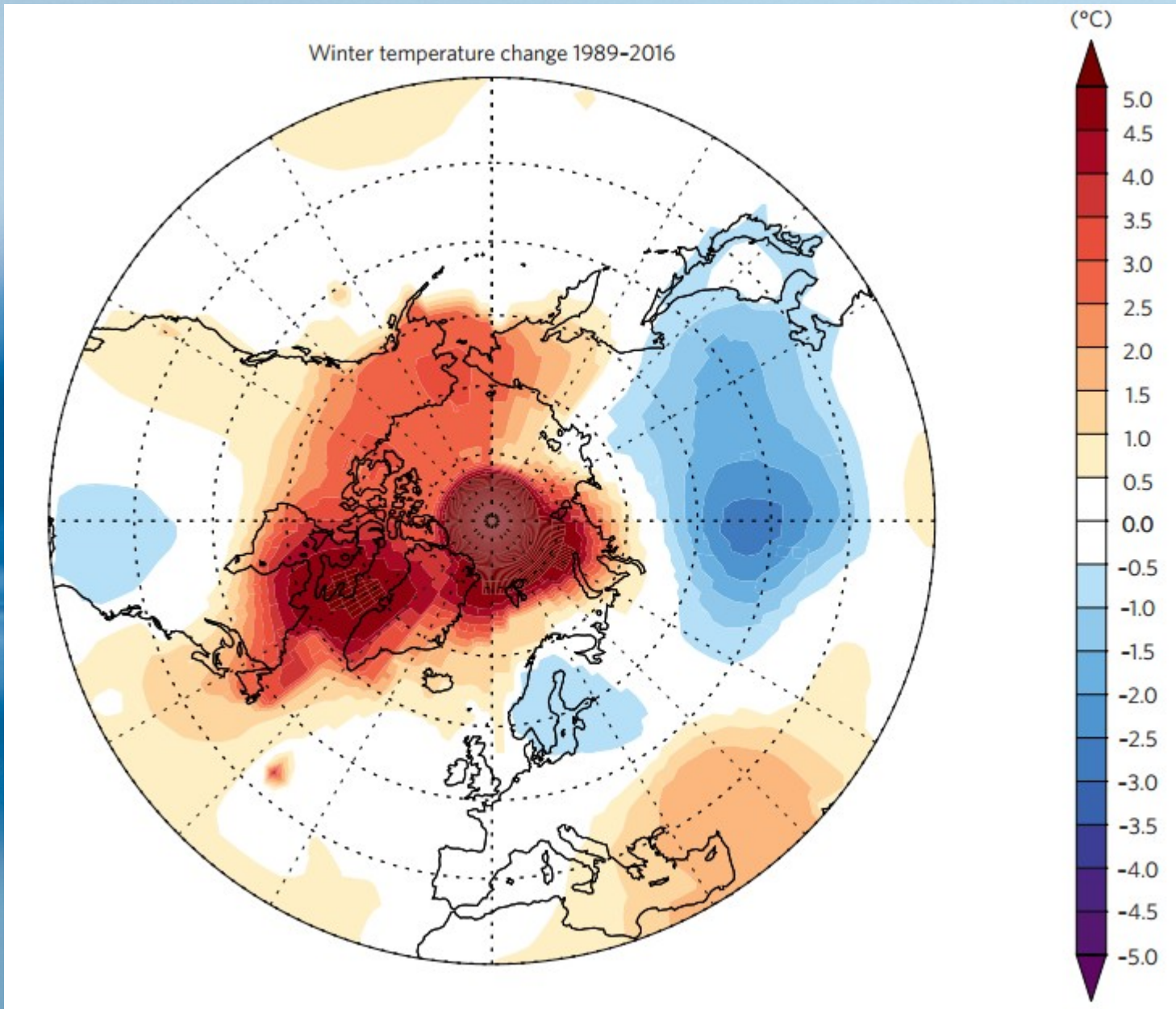
Mapa różnic temperatur zim DJF 2013-2022 w stosunku do zim z okresu 1951-1980 z serii GISS.

Anomalie strefowe temperatury dla zim DJF



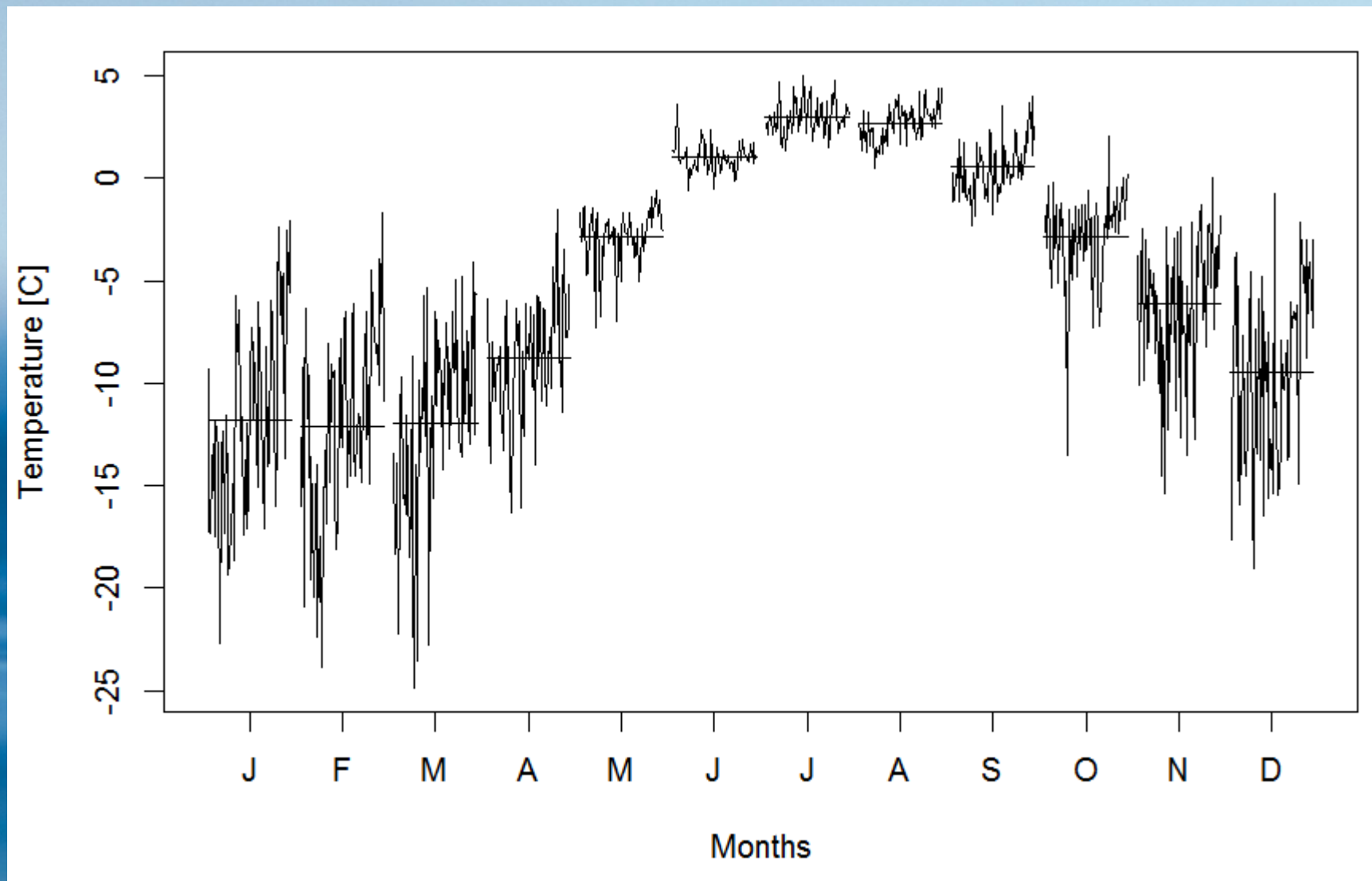
Anomalie temperatury dla zim 2013-2022, uśrednione strefowo, najlepszy sposób przedstawienia „amplifikacji polarnej”. Widać, że w Arktyce jest ona znacznie większa niż w Antarktyce.

Arktyczna amplifikacja zimą



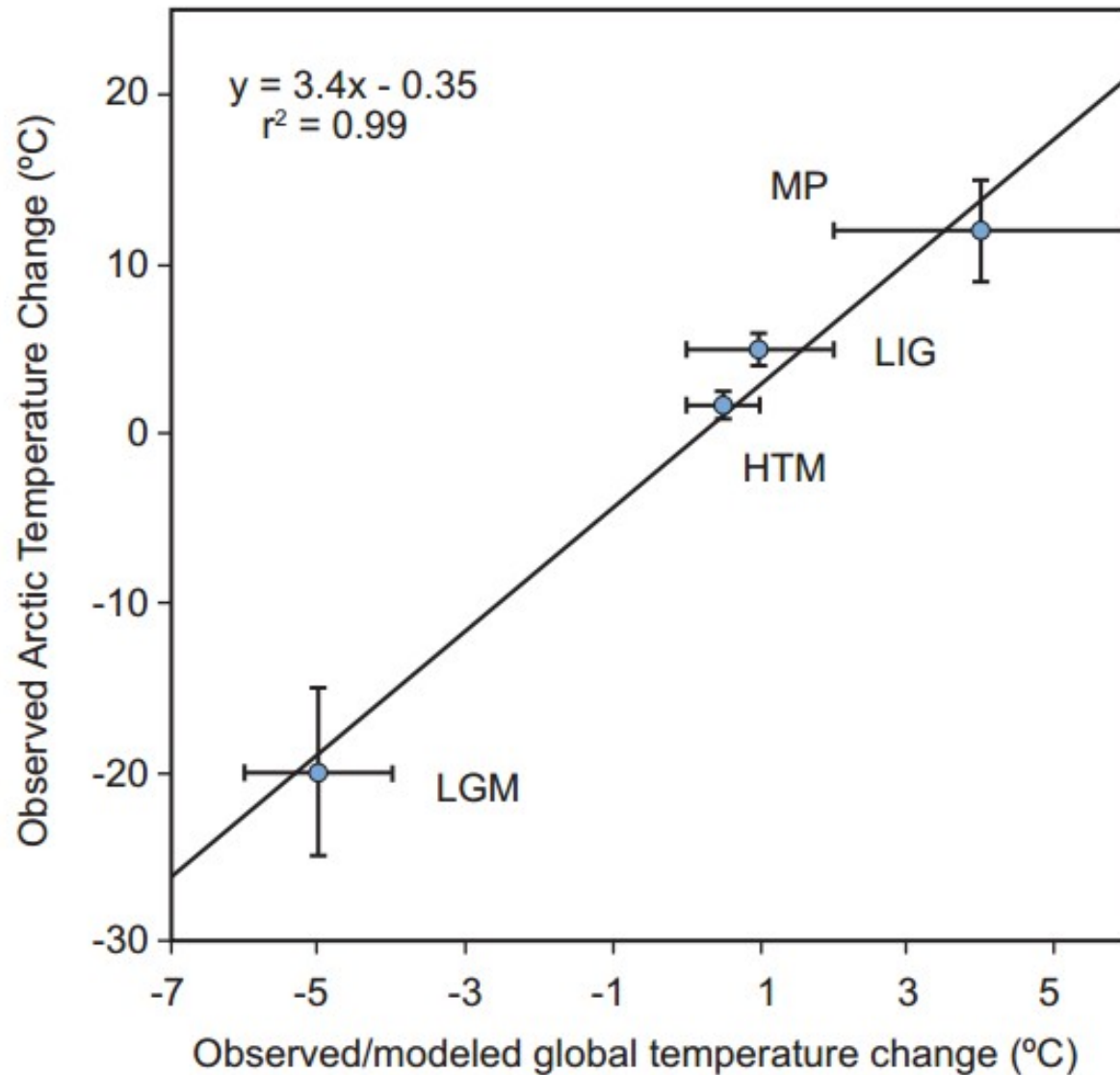
W okresie zimowym temperatury w Arktyce wzrosły w “okresie satelitarnym” 3-5 razy szybciej niż globalnie.

Arktyczna amplifikacja: przykład Spitsbergenu



Zmiany średniej temperatury każdego miesiąca w okresie 1950-2015 dla Południowego Spitsbergenu, na podstawie reanalizy NCEP/NCAR. Trendy liniowe dla tego okresu wynoszą prawie stopień na dekadę rocznie i ponad dwa zimą.

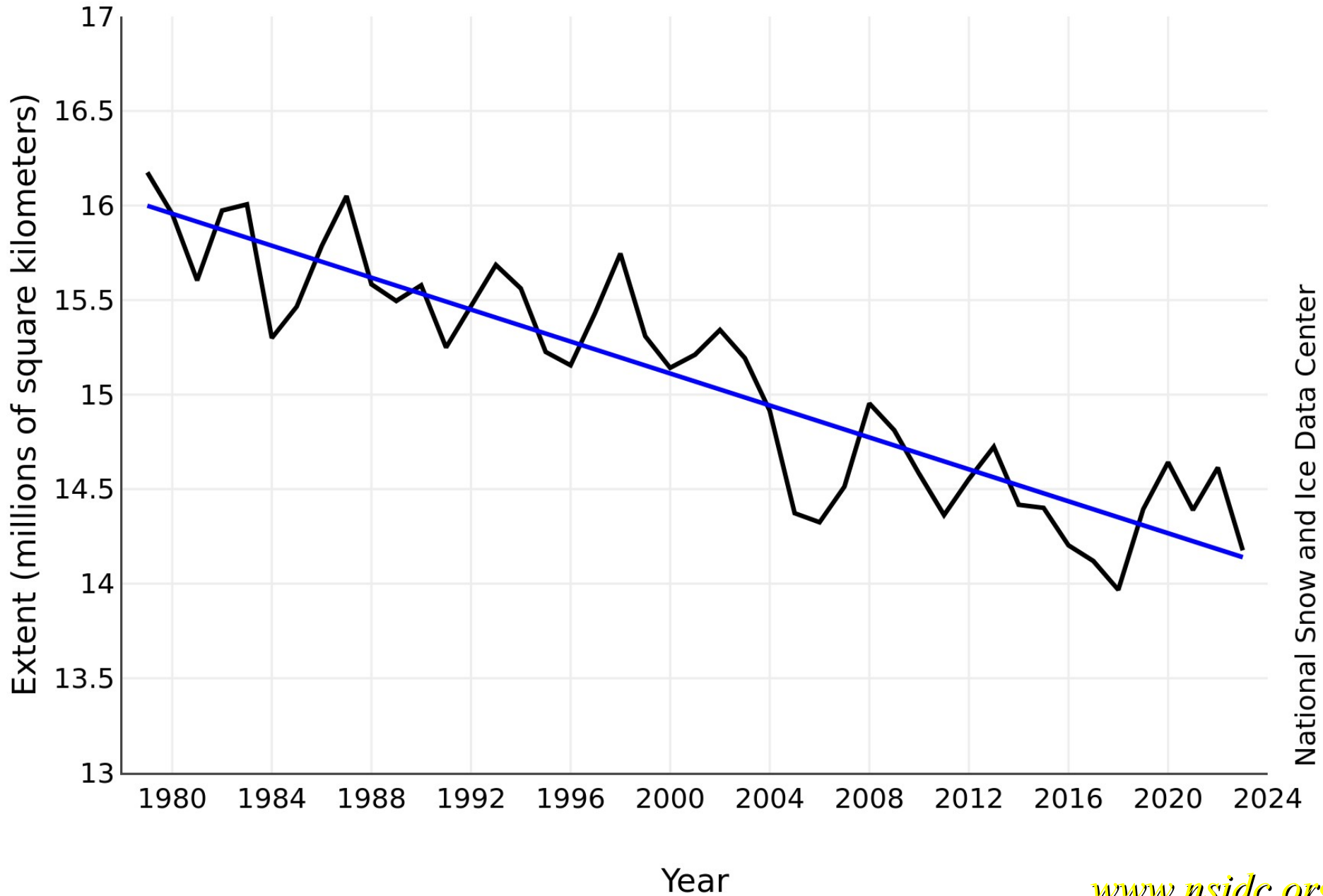
Arktyczna amplifikacja: paleodane



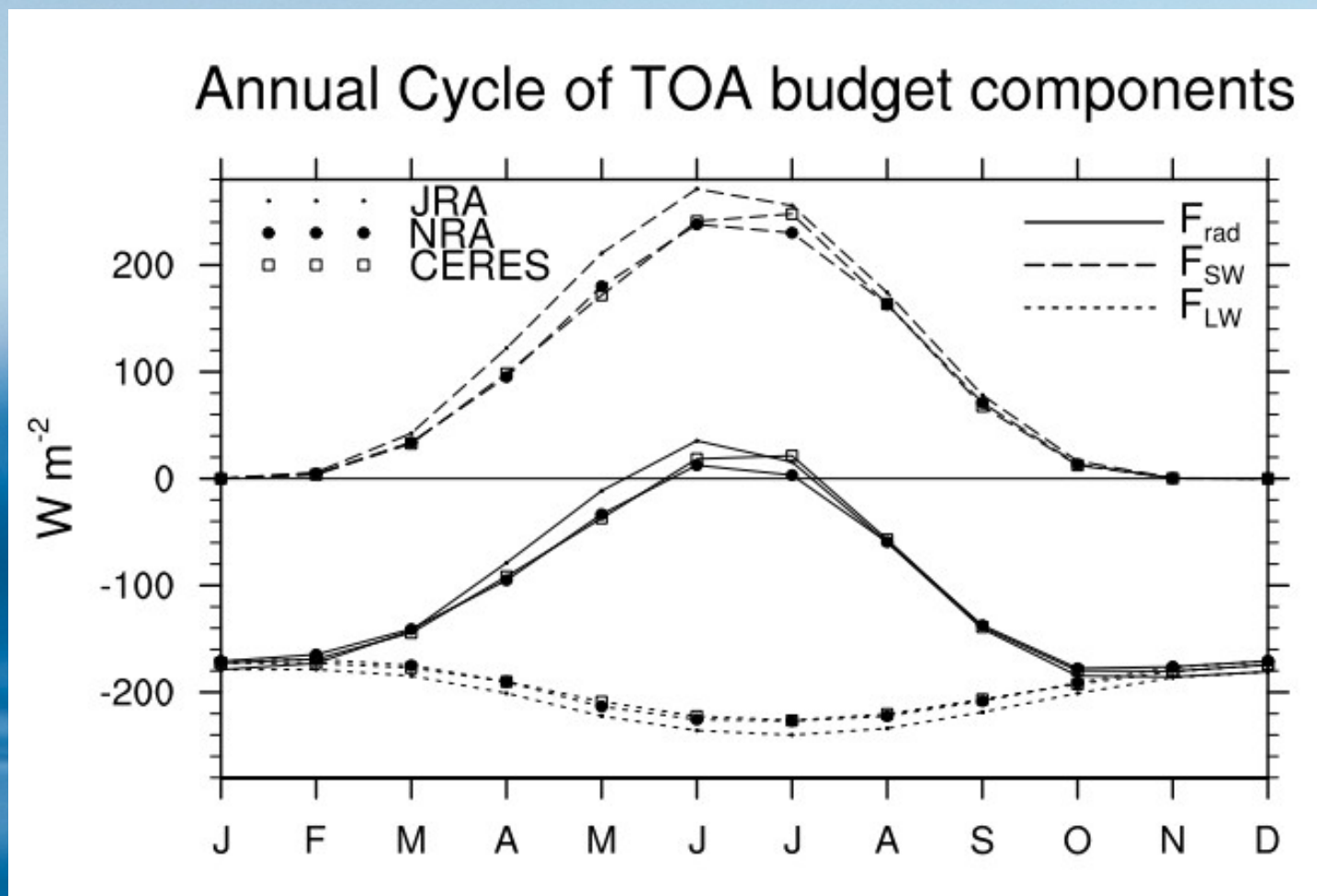
Zmiany średniej temperatury Arktyki oraz globalnej wskazują na istnienie arktycznej amplifikacji rzędu 3-4 także dla danych paleoklimatycznych.

LGM = Last Glacial Maximum 20 ka, HTM = Holocene Thermal 8 ka Maximum, LIG = Last Interglacial 130-125 ka, MP = Middle Pliocene 3.5 Ma.

Average Monthly Arctic Sea Ice Extent February 1979 - 2023



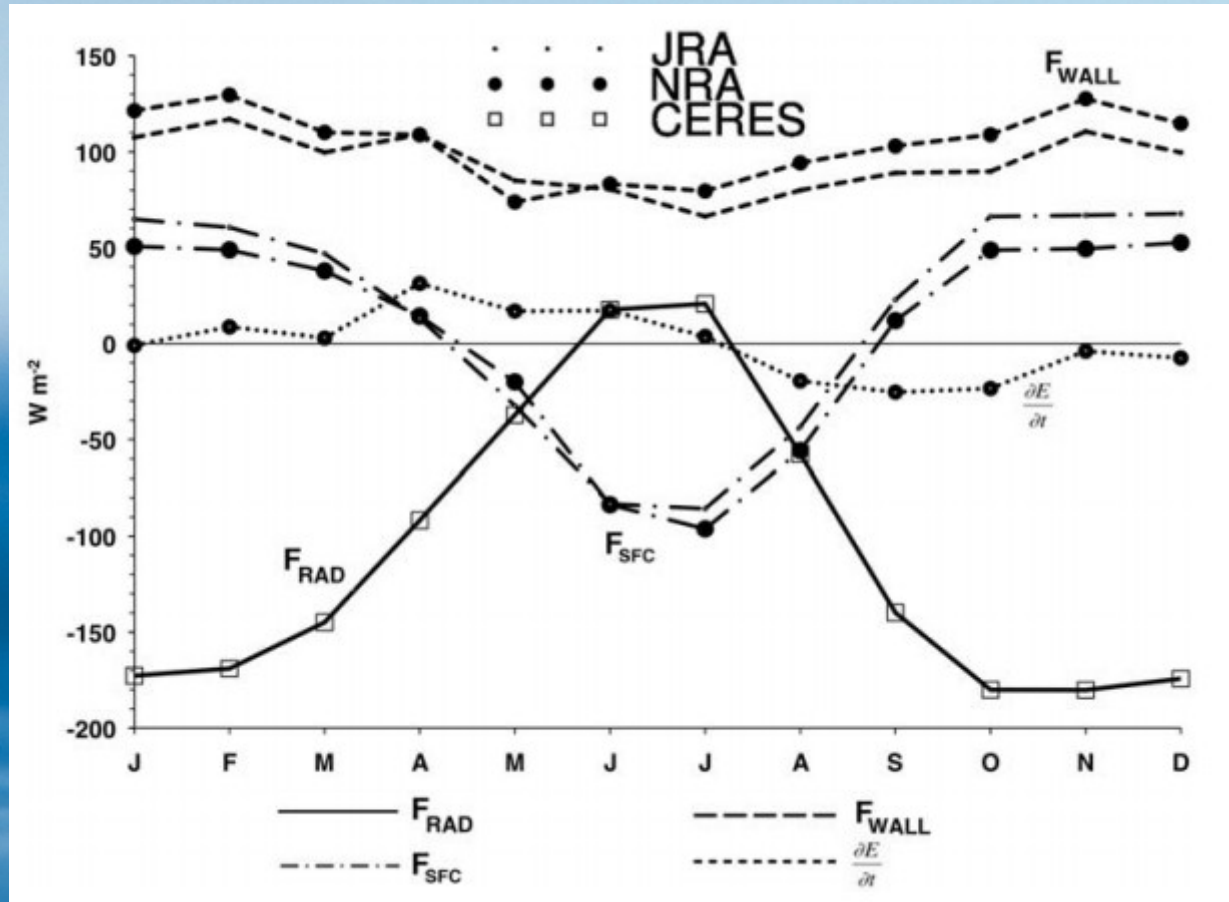
Budżet energetyczny Arktyki (szczyt atmosfery)



Roczny przebieg średnich strumieni krótkofalowych (SW), długofalowych (LW) oraz ich sumy (rad) dla Arktyki na szczycie atmosfery. Arktyka ogrzewa się radiacyjnie jedynie w lipcu i sierpniu. Średniorocznie wypromieniowuje w kosmos ok. 110 W/m². Musi to zostać wyrównane adwekcją (ok. 100 W/m² przez cyrkulacje atmosferyczną i ok 10 W/m² oceaniczną)

Porter et al 2010 (JGR)

Budżet energetyczny Arktyki (całkowity)



Roczny przebieg średnich strumieni radiacyjnych na szczycie atmosfery (RAD), strumieni przez powierzchnię morza (SFC), zmian zawartości ciepła dE/dt oraz adwekcji atmosferycznej, będącej residuum (ALL). Widać, że ocean oddaje ciepło zgromadzone latem przez pozostałe osiem miesięcy roku.

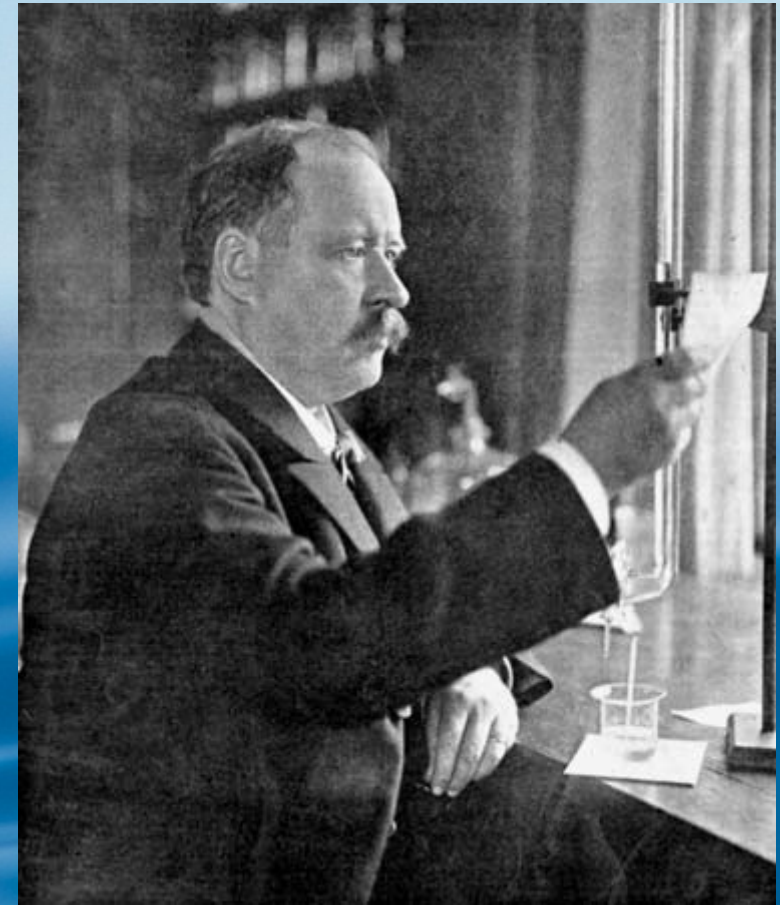
Mechanizm amplifikacji polarnej (wersja podręcznikowa)

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[FIFTH SERIES.]

APRIL 1896.

XXXI. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground.* By Prof. SVANTE ARRHENIUS *.



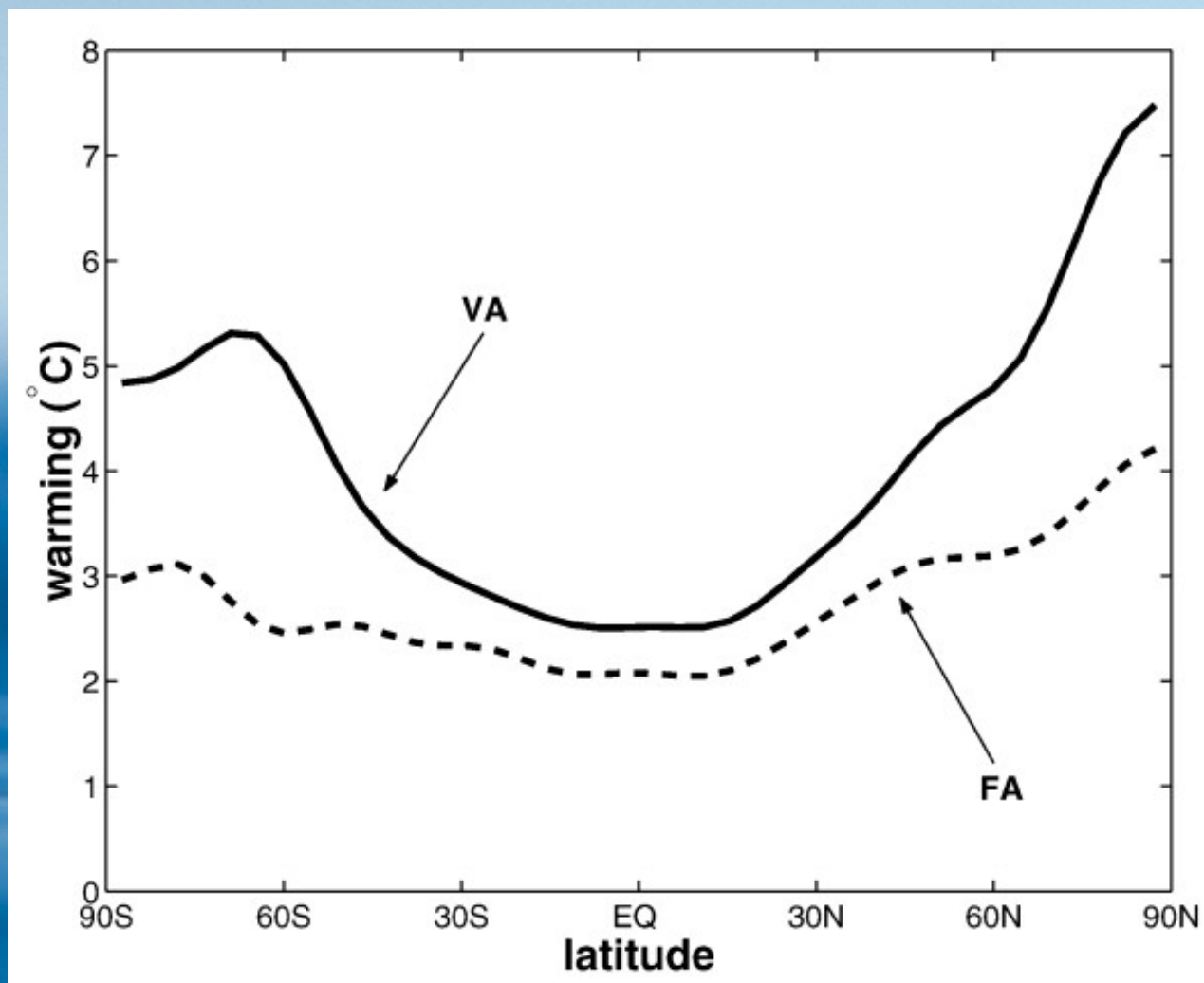
W najprostszej wersji amplifikacja polarna wynika ze zmian albedo w wyniku topienia śniegu na lądzie i lodu na morzu w wyniku zmian wymuszenia. Powoduje to dodatkową zmianę temperatury spowodowaną zmianami ilości promieniowania słonecznego zaabsorbowanego przez ocean lub powierzchnię ziemi.

Arrhenius 1896 (Philosophical Magazine)

Mechanizm amplifikacji polarnej (wersja podręcznikowa)

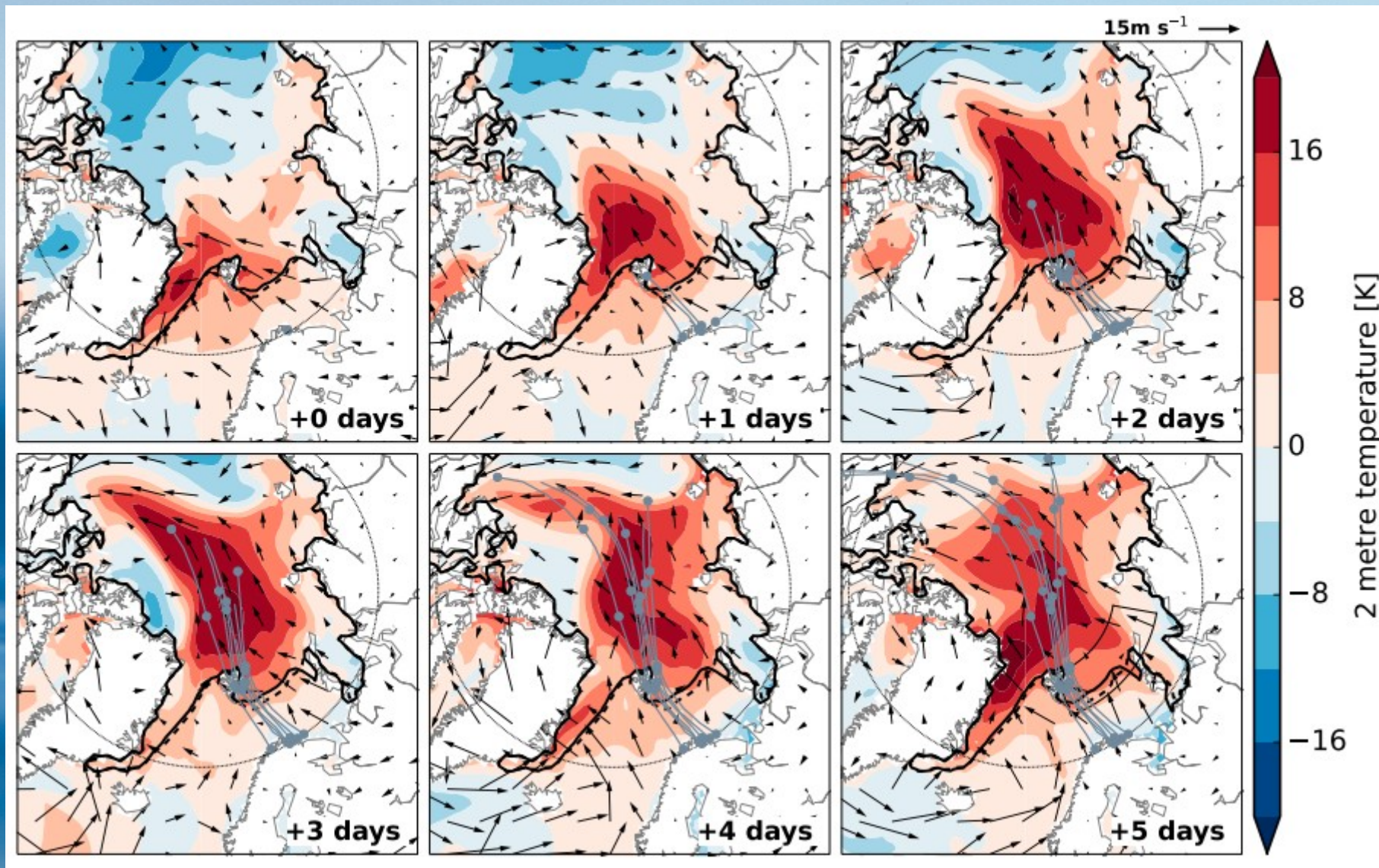
"A glance at this Table shows that the influence is nearly the same over the whole earth. The influence has a minimum near the equator, and increases from this to a flat maximum that lies the further from the equator the higher the quantity of carbonic acid in the air. [...] The influence will also be greater the higher the value of v [albedo], that is in general somewhat greater for land than for ocean. The influence is in general greater in the winter than in the summer [...]. On account of the nebulosity of the Southern hemisphere, the effect will be less there than in the Northern hemisphere. An increase in the quantity of carbonic acid will of course diminish the difference in temperature between day and night. A very important secondary elevation of the effect will be produced in those places that alter their albedo by the extension or regression of the snow-covering [...], and this secondary effect will probably remove the maximum effect from lower parallels to the neighbourhood of the poles."

Amplifikacja: modele klimatyczne



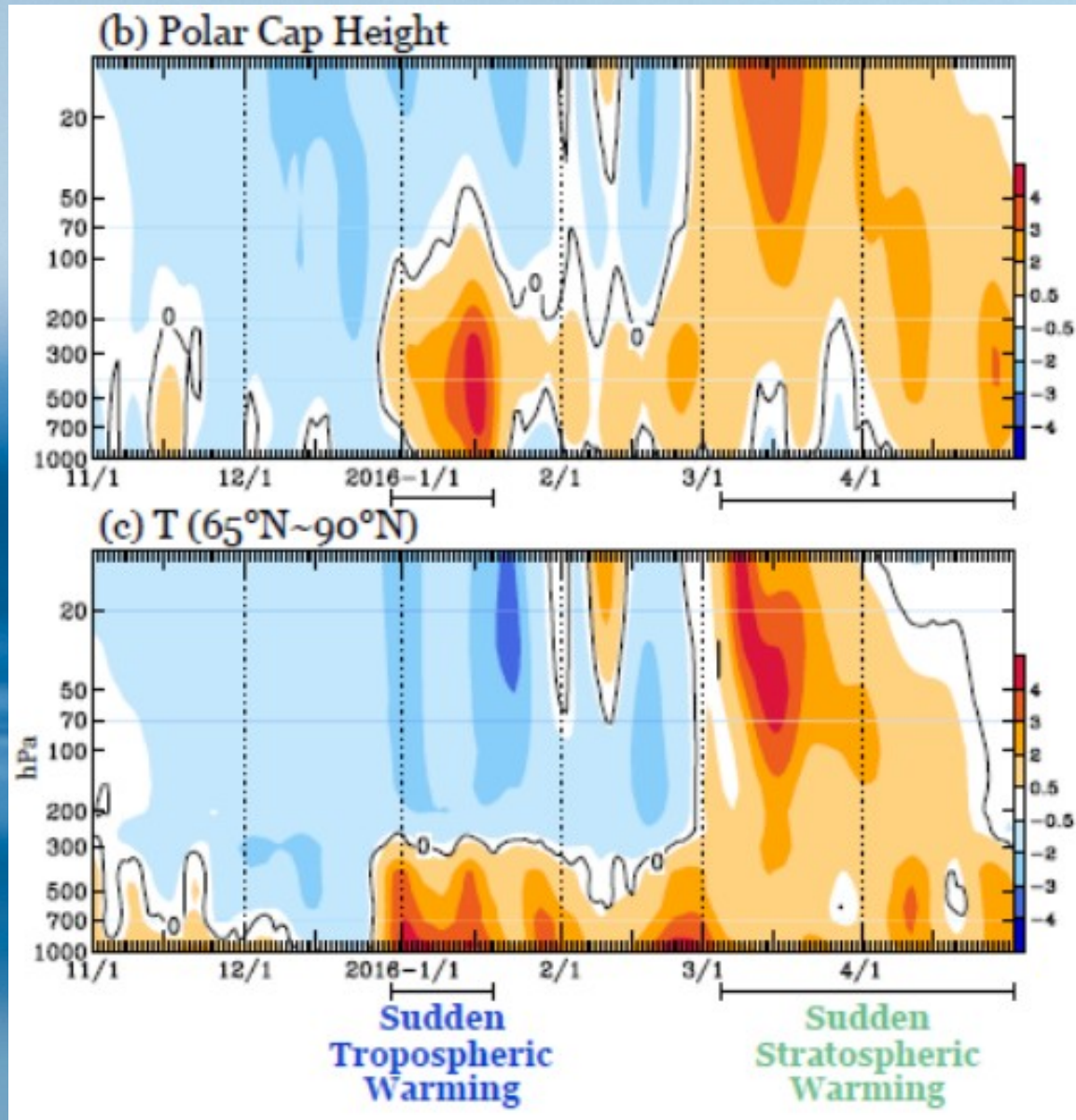
Zmiana temperatury w wyniku podwojenia stężenia CO₂ dla wersji modelu z ustalonym albedo (FA) i zmiennym (VA). Zwraca uwagę, że nawet przy stałym albedo istnieje amplifikacja polarna oraz, że model zawyża amplifikację dla Antarktyki i zaniża dla Arktyki.

Kandydat: wilgotna adwekcja



Przykład zimowego epizodu mokrej adwekcji (początek 27 grudnia 1999), zjawiska, które jest kandydatem na dodatkowe zimowe “dogrzewanie” Arktyki.

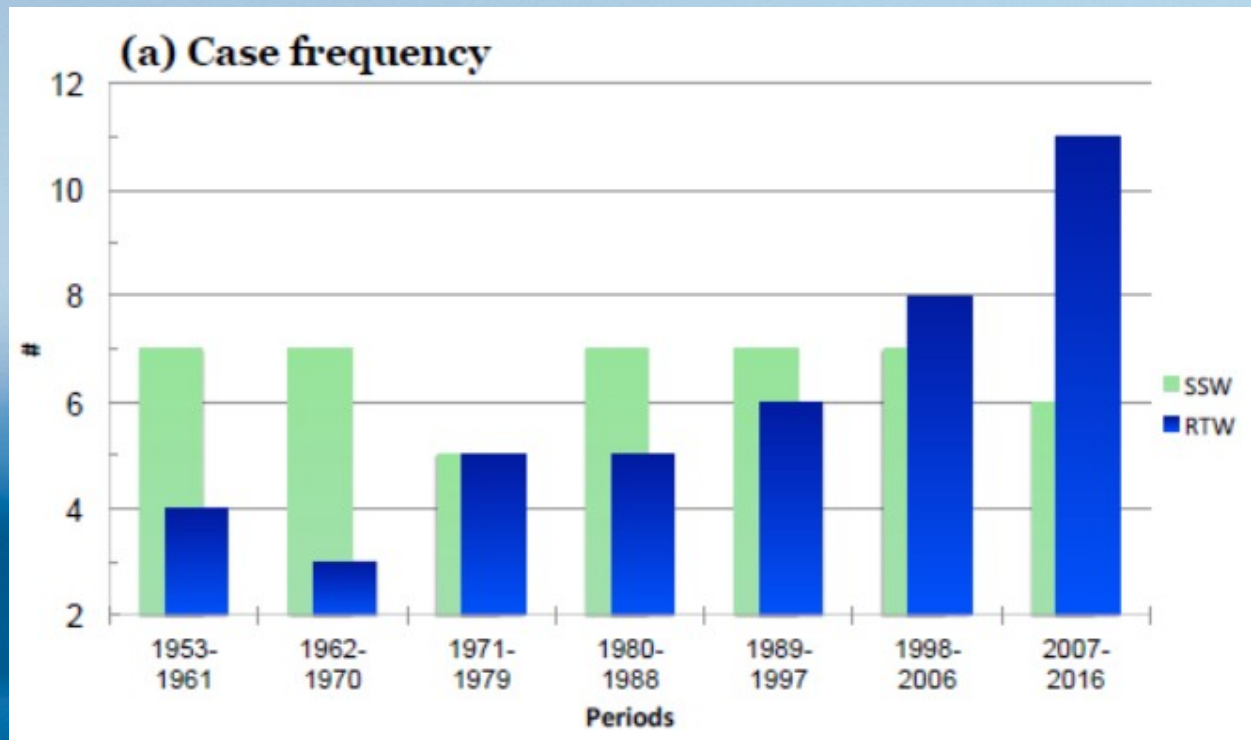
Epizod wilgotnej adwekcji ze stycznia 2016



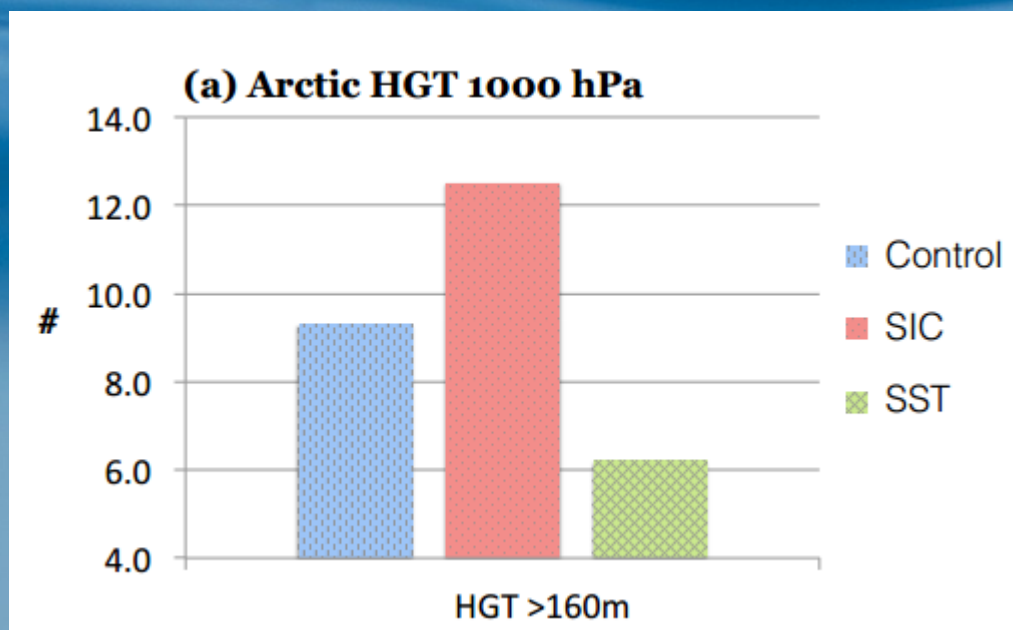
Zima 2015/16, rekordowo ciepła w Arktyce, miała swój “wilgotny” epizod, rozpoczęty 1 stycznia, nazwany w tej analizie STW, jako przeciwieństwo zmiany cyrkulacji schodzącej ze stratosfery (SSW). Zwraca uwagę duża wysokość ocieplenia (do poziomu 300 hPa).

Pewnym problemem może być brak analogicznego epizodu zimą 2016/17... najprawdopodobniej jeszcze cieplejszą.

Epizody mokrej adwekcji sprzeżeniem zwrotnym

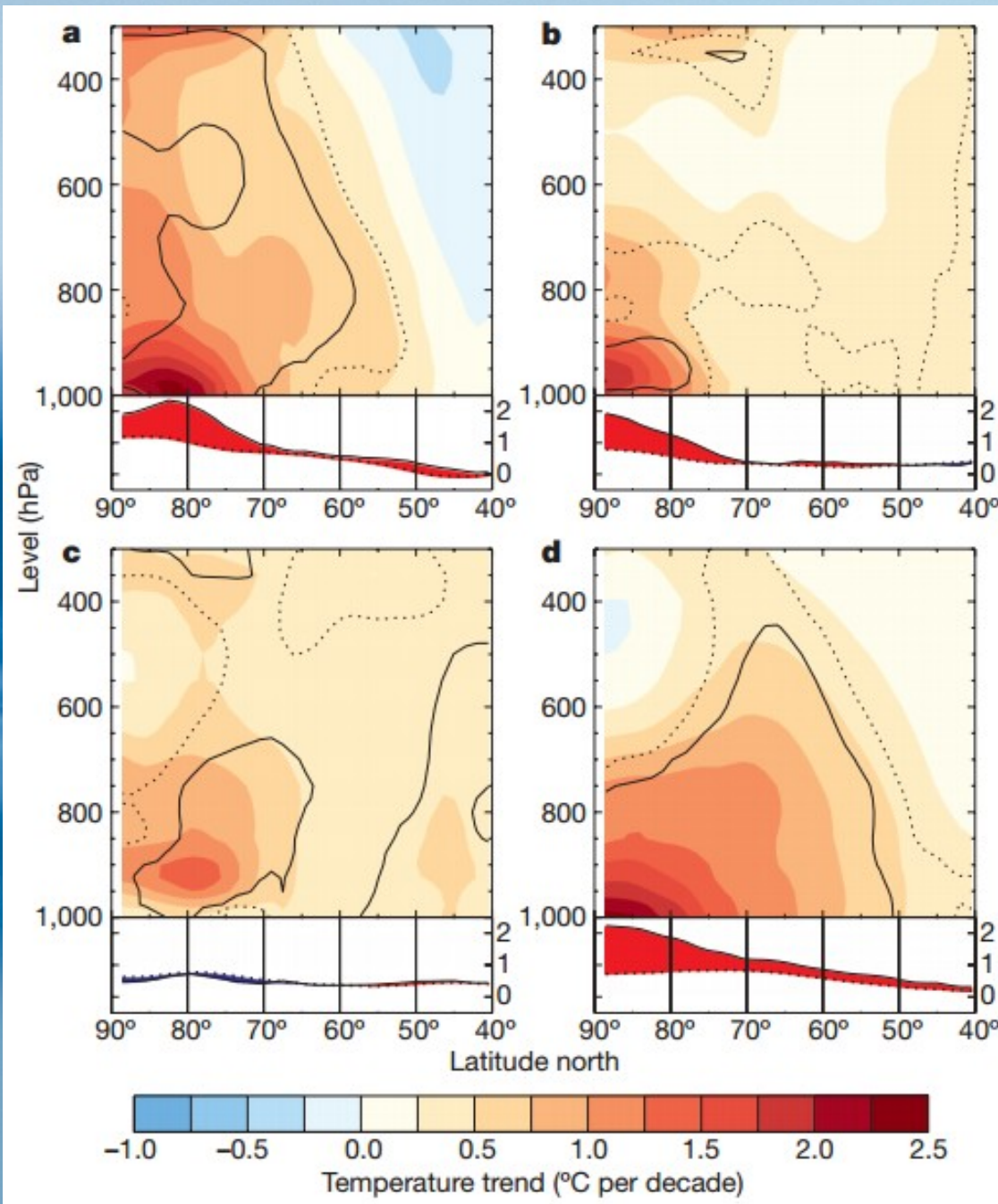


Epizody ocieplenia troposferycznego (RTW) zimą w Arktyce stają się coraz częstsze, w przeciwieństwie do stratosferycznych (SSW).



Jednak analiza przy pomocy modelu pokazuje, że jest to spowodowane zmianami zasięgu lodu (eksperyment SIC), a nie np. zmianami temperatury oceanów światowych (eksperyment SST)

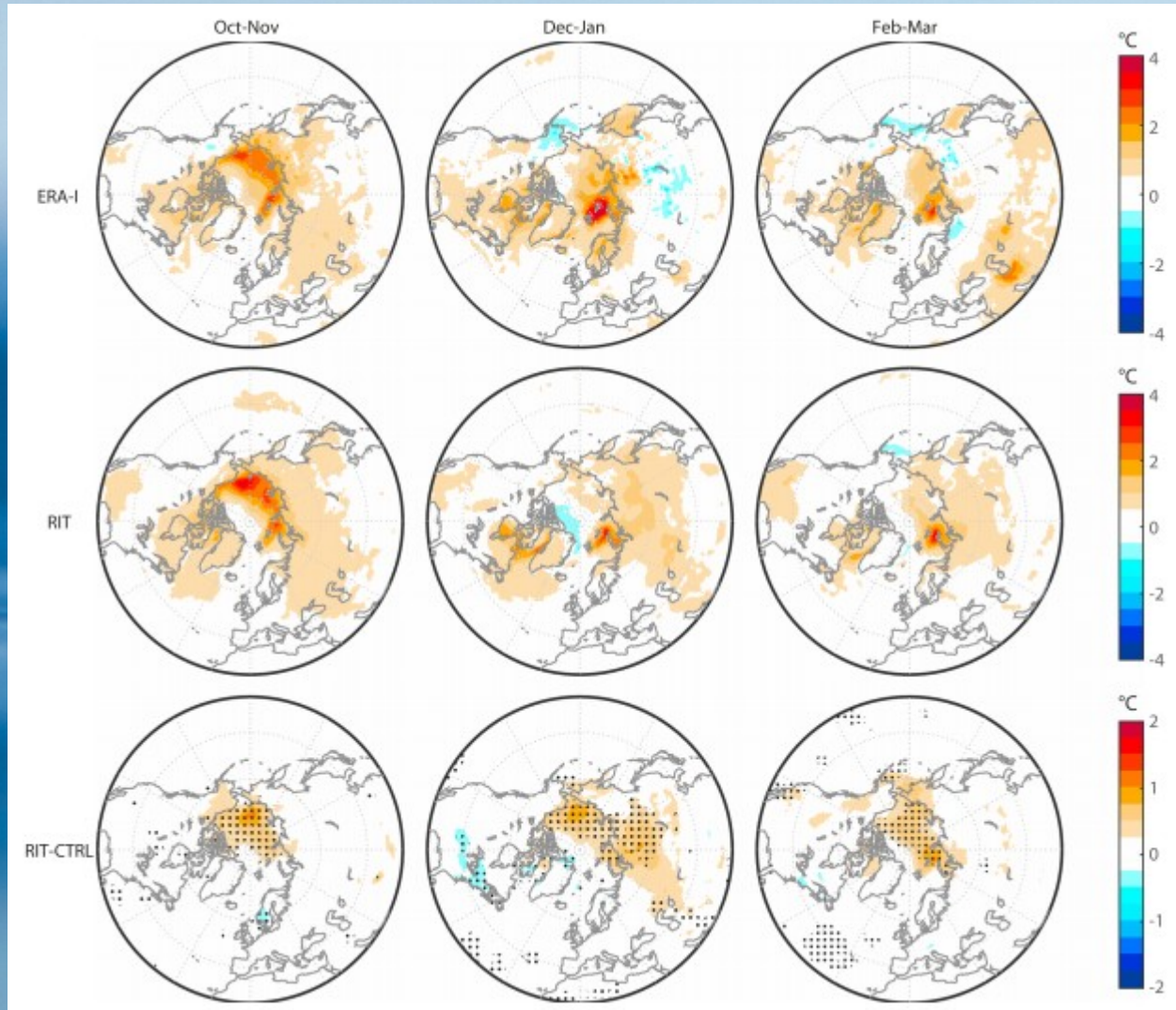
Ocieplenie Arktyki związane z powierzchnią



Trendy temperatury troposfery dla lat 1989-2008 dla a) zimy, b) wiosny, c) lata, d) jesieni oraz ich wykresy dla całej troposfery 300-1000 hPa i warstwy przywodnej 950-1000 hPa.

Największe trendy ocieplenia występują przy powierzchni. Autorzy konkludują, że najważniejszym elementem „arktycznej amplifikacji” jest zmniejszenie pokrycia lodem Arktyki, a adwekcja ogrzewa raczej górną troposferę.

Kandydat: ciepło z oceanu



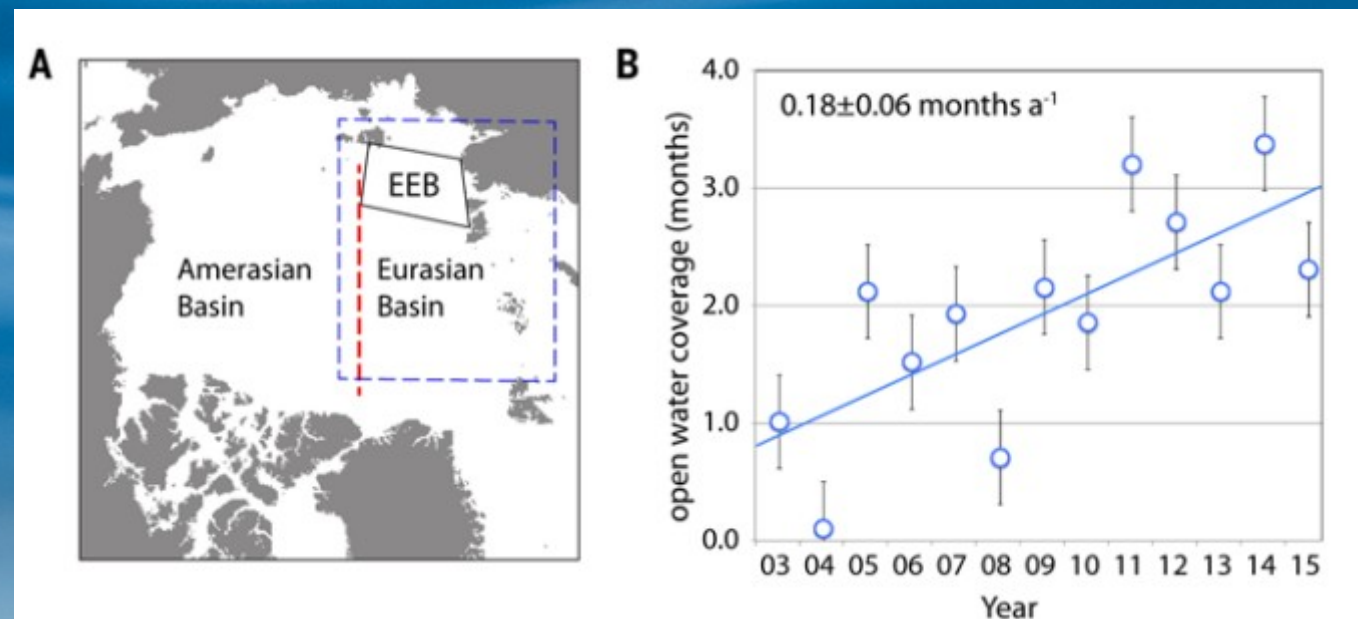
Reakcja temperatury przy powierzchniowej (atmosferycznej) na ubytek lodu w (górze) reanalizie ERA-I, modelu z ubytkiem lodu RIT (środek) i różnica RIT-CTRL (dół) dla trzech okresów dwumiesięcznych: ON, DJ i FM.

Cite as: I. V. Polyakov *et al.*, *Science*
10.1126/science.aai8204 (2017).

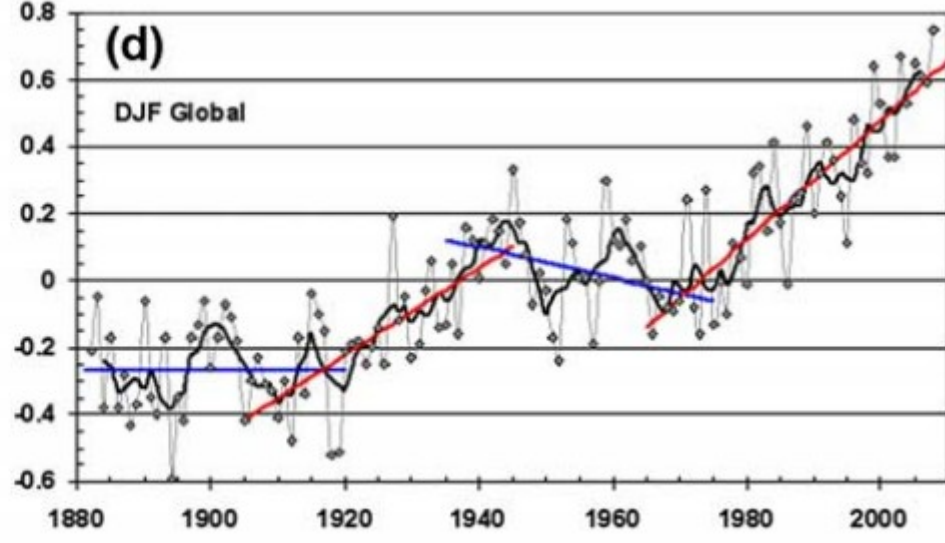
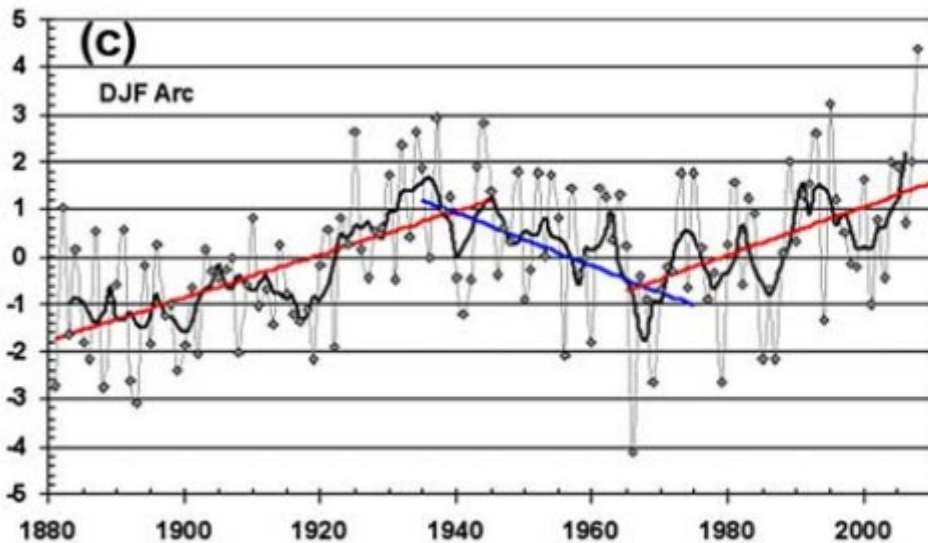
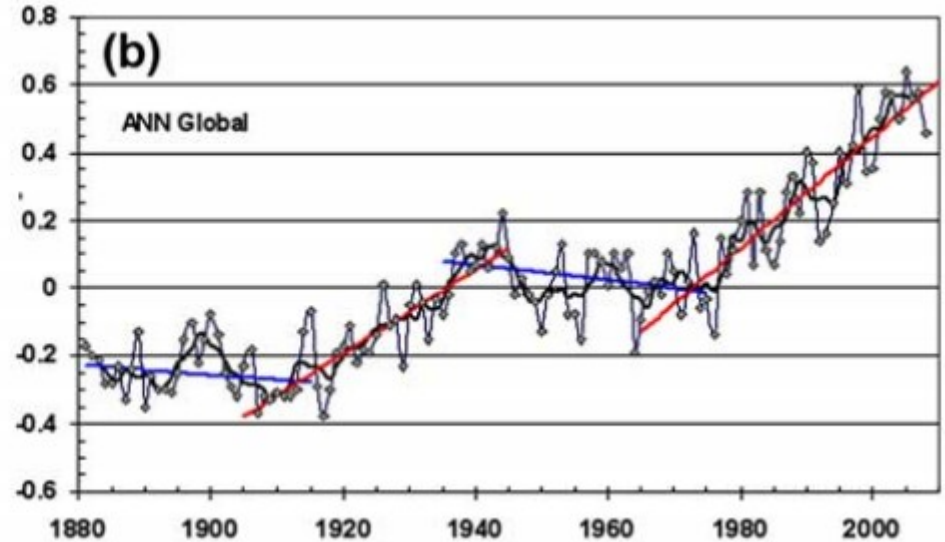
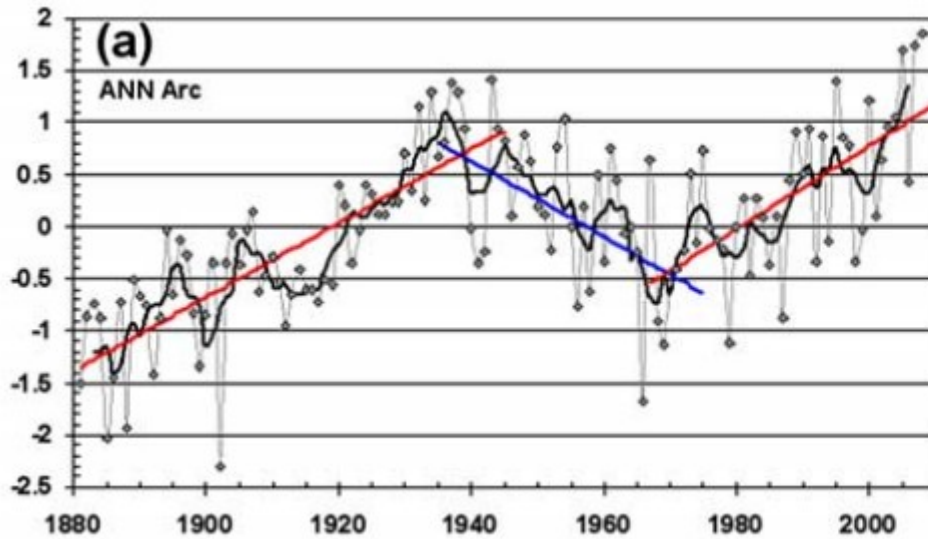
Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean

Igor V. Polyakov,^{1*} Andrey V. Pnyushkov,² Matthew B. Alkire,³ Igor M. Ashik,⁴ Till M. Baumann,¹ Eddy C. Carmack,⁵ Ilona Goszczko,⁶ John Guthrie,³ Vladimir V. Ivanov,⁷ Torsten Kanzow,⁸ Richard Krishfield,⁹ Ronald Kwok,¹⁰ Arild Sundfjord,¹¹ James Morison,³ Robert Rember,² Alexander Yulin⁴

Dane z mooringów postawionych w rejonie EEB pokazują, że strumień ciepła dopływającego z wody atlantyckiej do powierzchni zwiększył się w ostatnich latach w rejonie EEB kilkakrotnie, do około 10 W/m²

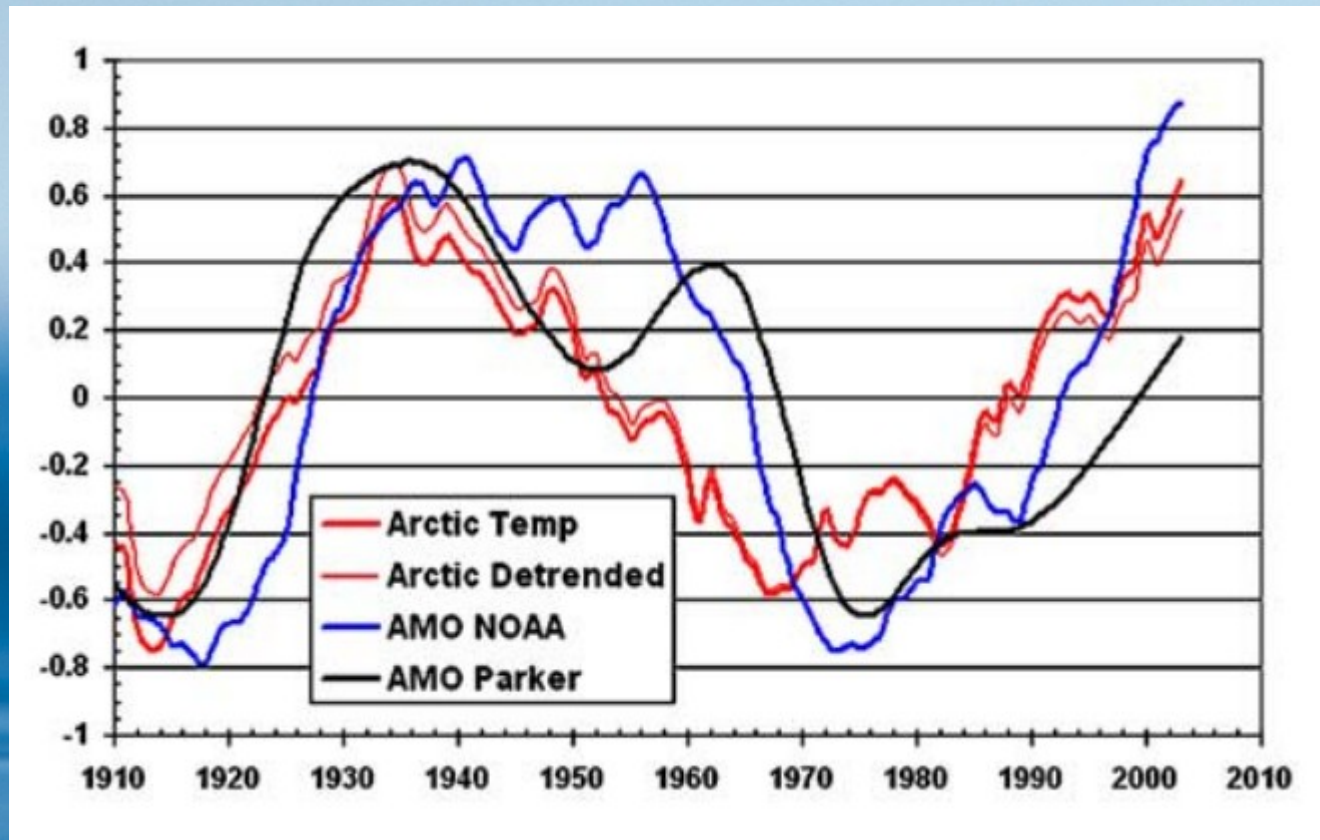


Zmiany temperatury globalnej oraz arktycznej



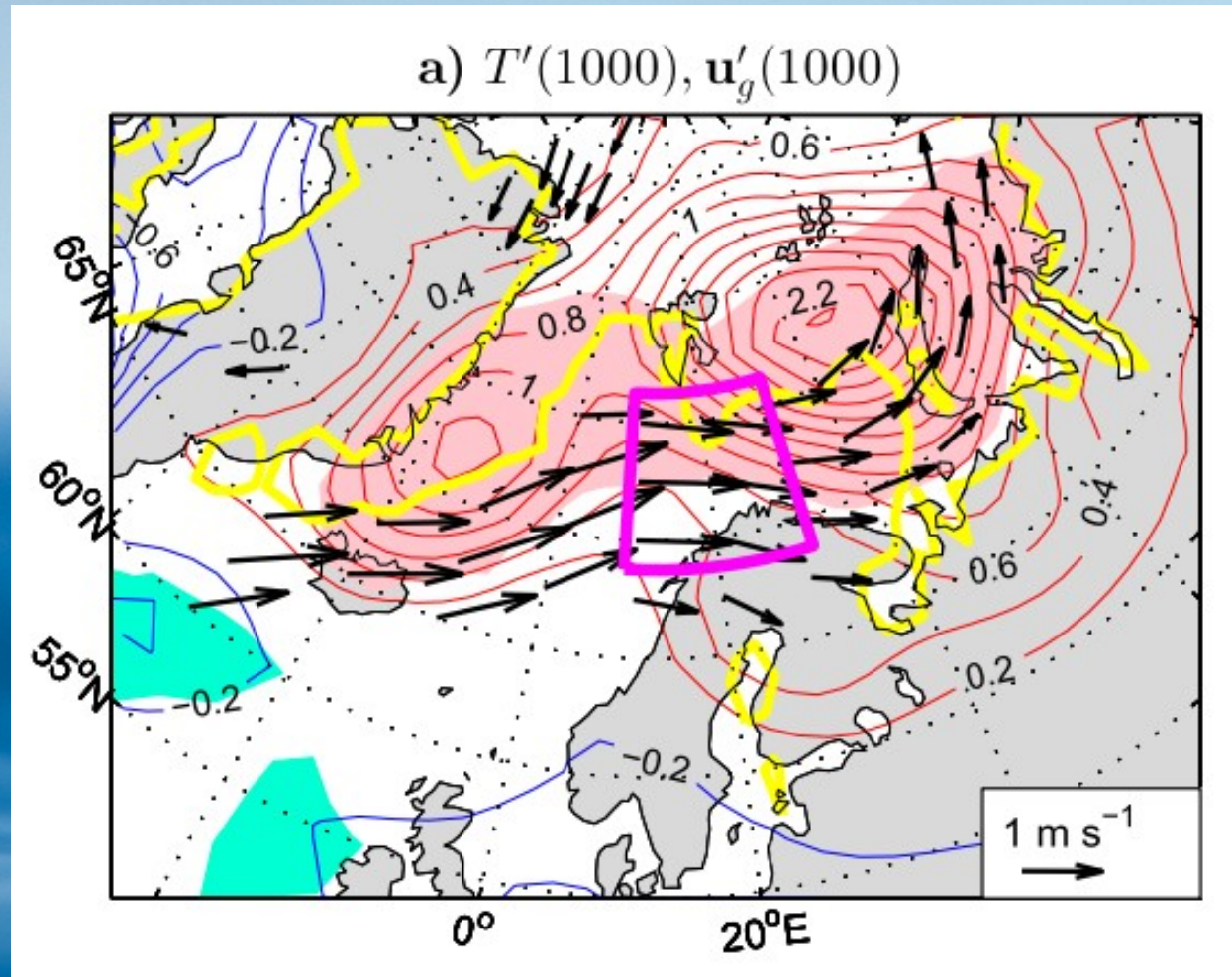
Anomalie temperatury Arktyki, 64-90 N (po lewej) i globalne (po prawej) całoroczne (górną) i dla zimy borealnej DJF (dół).

Kandydat: temperatura Pn. Atlantyku



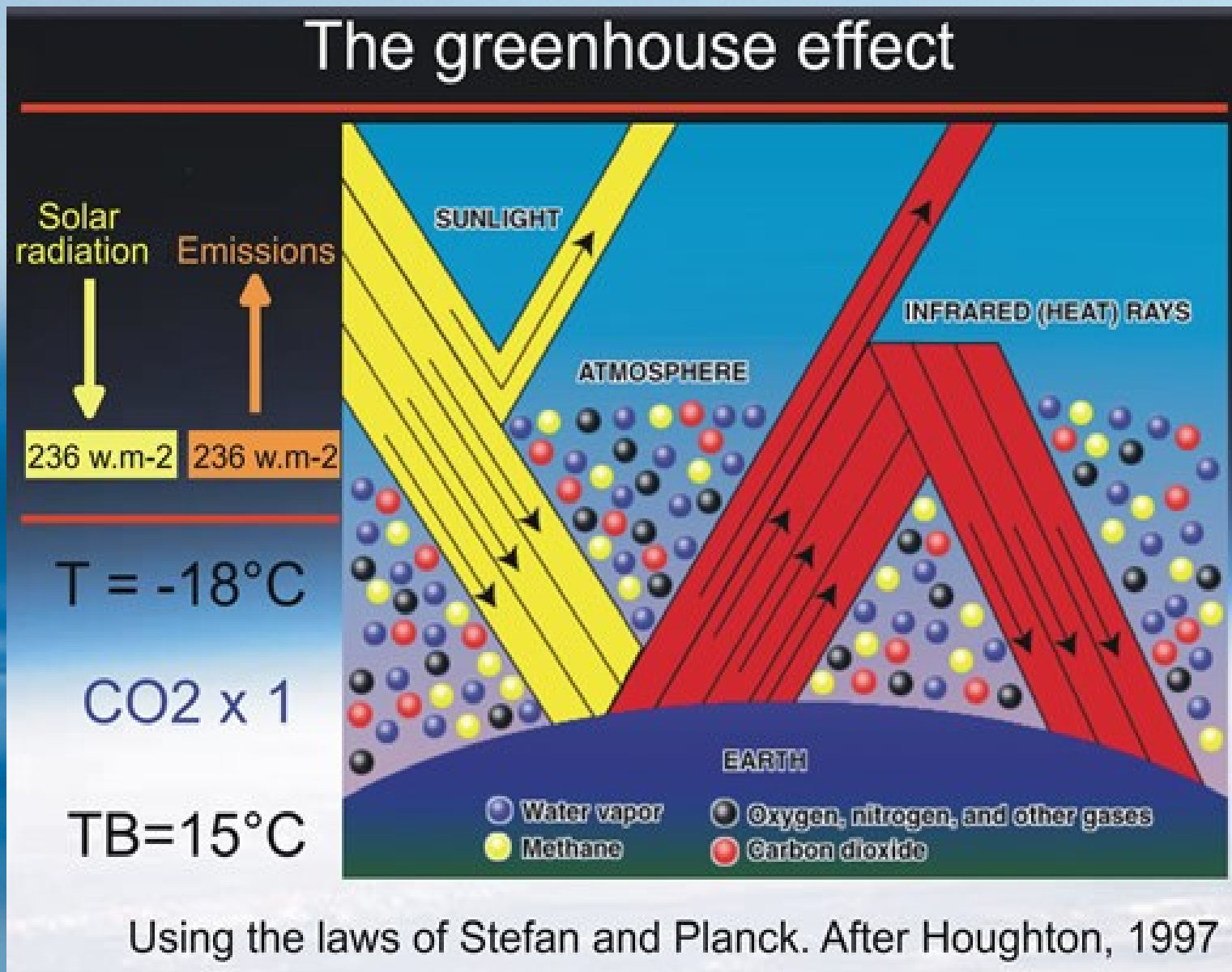
Temperatury Arktyki rosły i malały w XX wieku wraz z temperaturami Północnego Atlantyku (klasyczny indeks AMO – niebieski). Wygląda na to, że temperatury te wraz z efektem cieplarnianym stanowią wymuszenie arktycznej amplifikacji.

Mechanizm oddziaływania temperatur atlantyckich



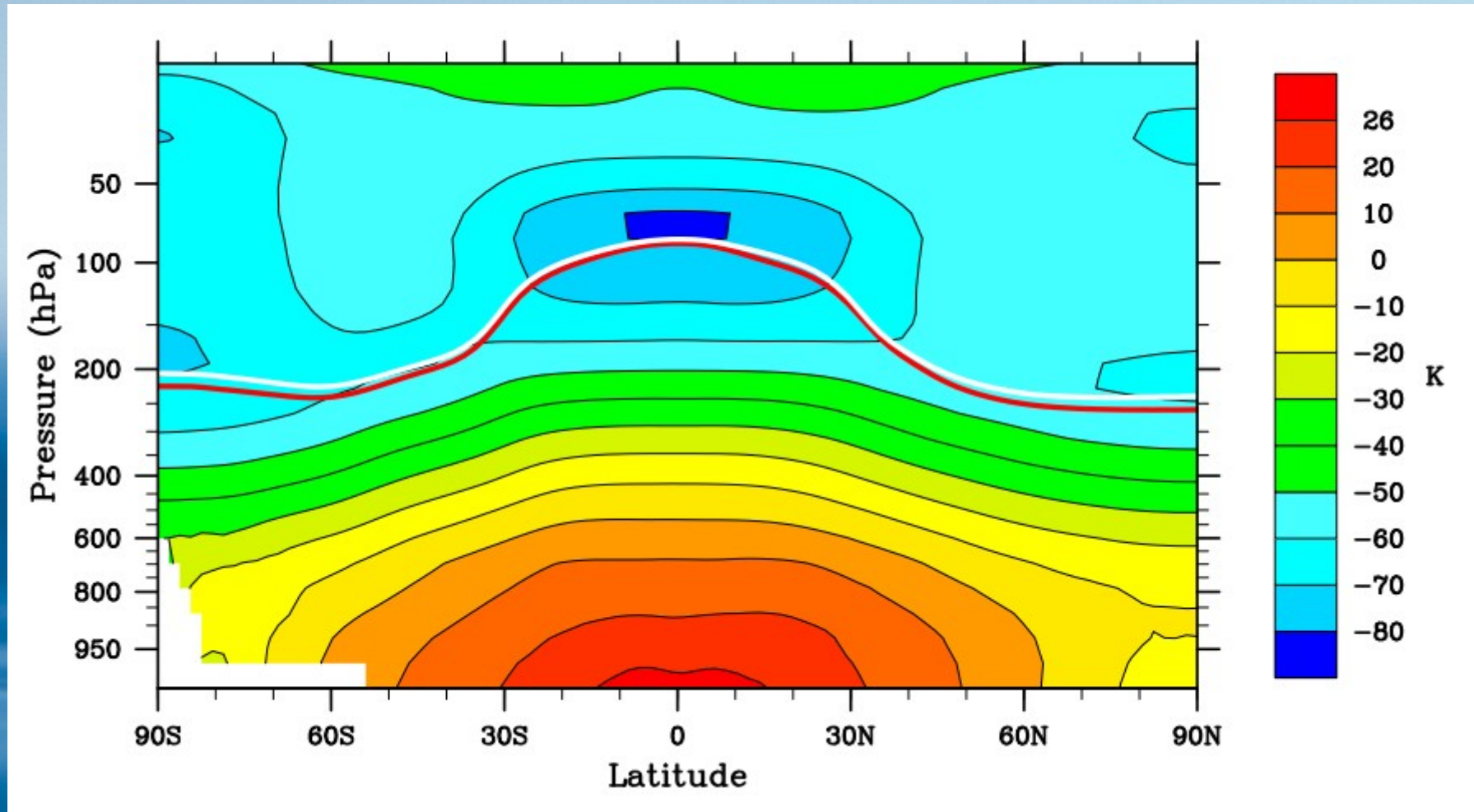
Regresja zimowych temperatur (kontury) i wiatrów (strzałki) z lat 1983-2006 z indeksem temperatury wody atlantyckiej wpływającej do Arktyki przez Morze Barentsa (fioletowy prostokąt) poprzedniego lata. Okazuje się, że cieplejszy Atlantyk powoduje większą adwekcję atmosferyczną ciepła do Arktyki!

Jak działają gazy cieplarniane?



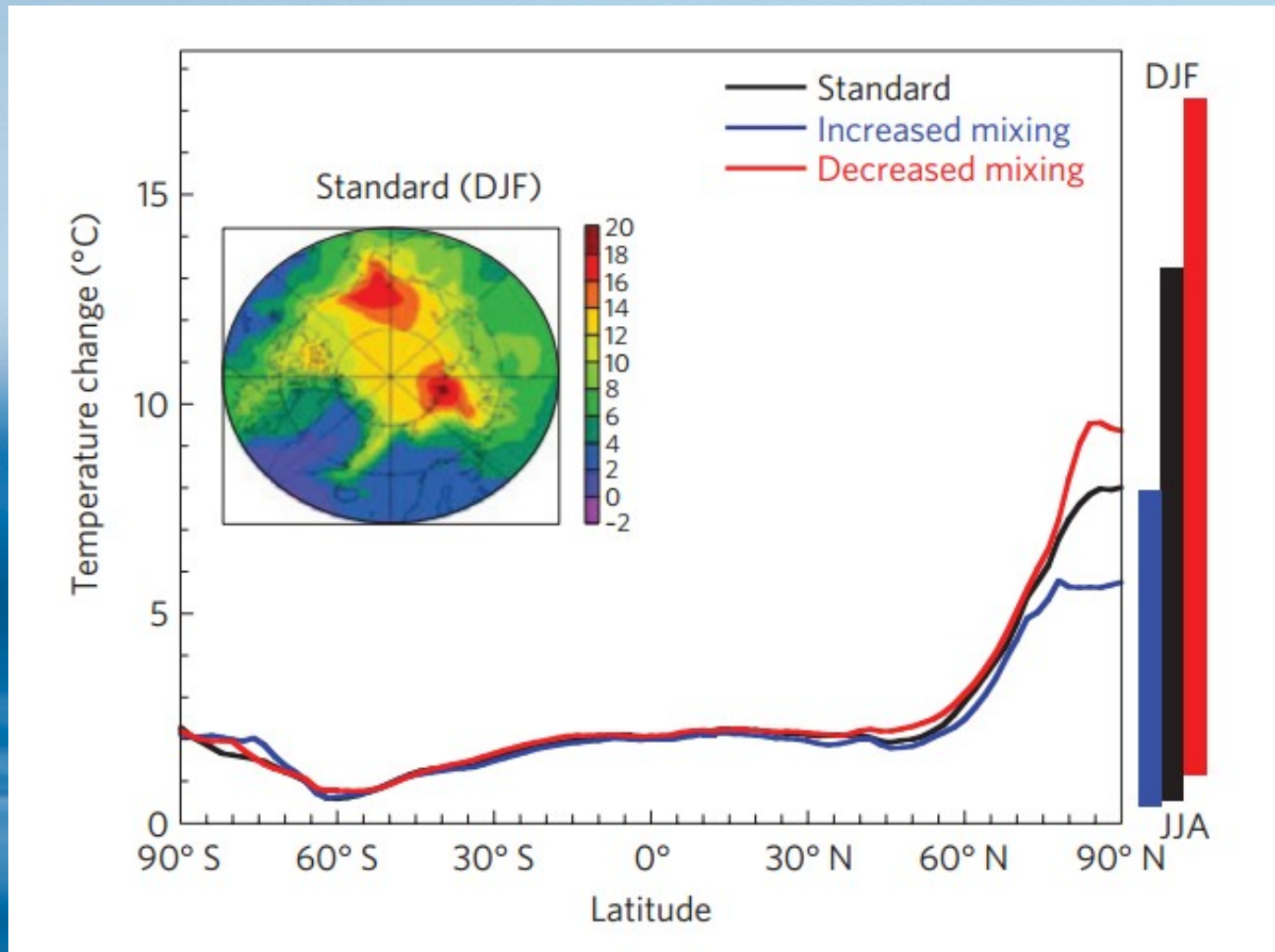
Proste użycie podstawowych praw fizyki i geometrii pozwala wyliczyć, że Ziemia byłaby 33 stopnie zimniejsza gdyby nie „gazy cieplarniane” H_2O , CO_2 , CH_4 .

Średnia temperatura atmosfery ziemskiej



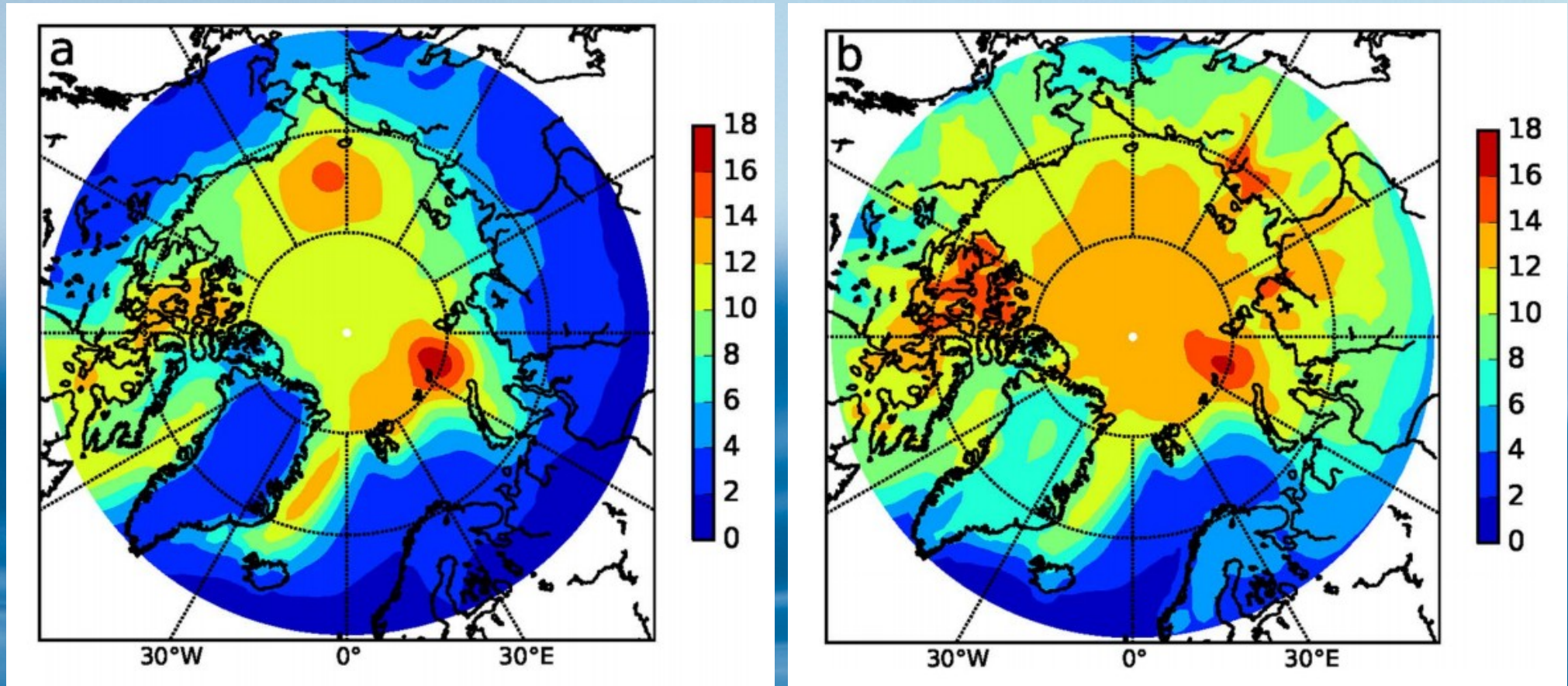
Do niedawna uważano, że efekt cieplarniany jest mniejszy w Arktyce w wyniku mniejszego gradientu pionowego temperatur. Jednak inwersja temperatur jaka tam występuje, szczególnie zimą, sprawia, że klasyczny model atmosfery w tym rejonie zawodzi...

Kandydat: zimowa inwersja arktyczna



Zimowa inwersja temperatur w Arktyce (chłodniejsza atmosfera przy powierzchni) wpływa na zmniejszenie wypromieniowanego w kosmos promieniowania długofalowego z najniższych warstw, wyższe natomiast grzeją powierzchnię! Wykres przedstawia wzrost temperatur przy podwojeniu CO₂ dla podwojonego i zmniejszonego o połowę mieszania w atmosferze. Zwraca uwagę brak tego efektu w Antarktyce.

Ocean Arktyczny przechowuje ciepło

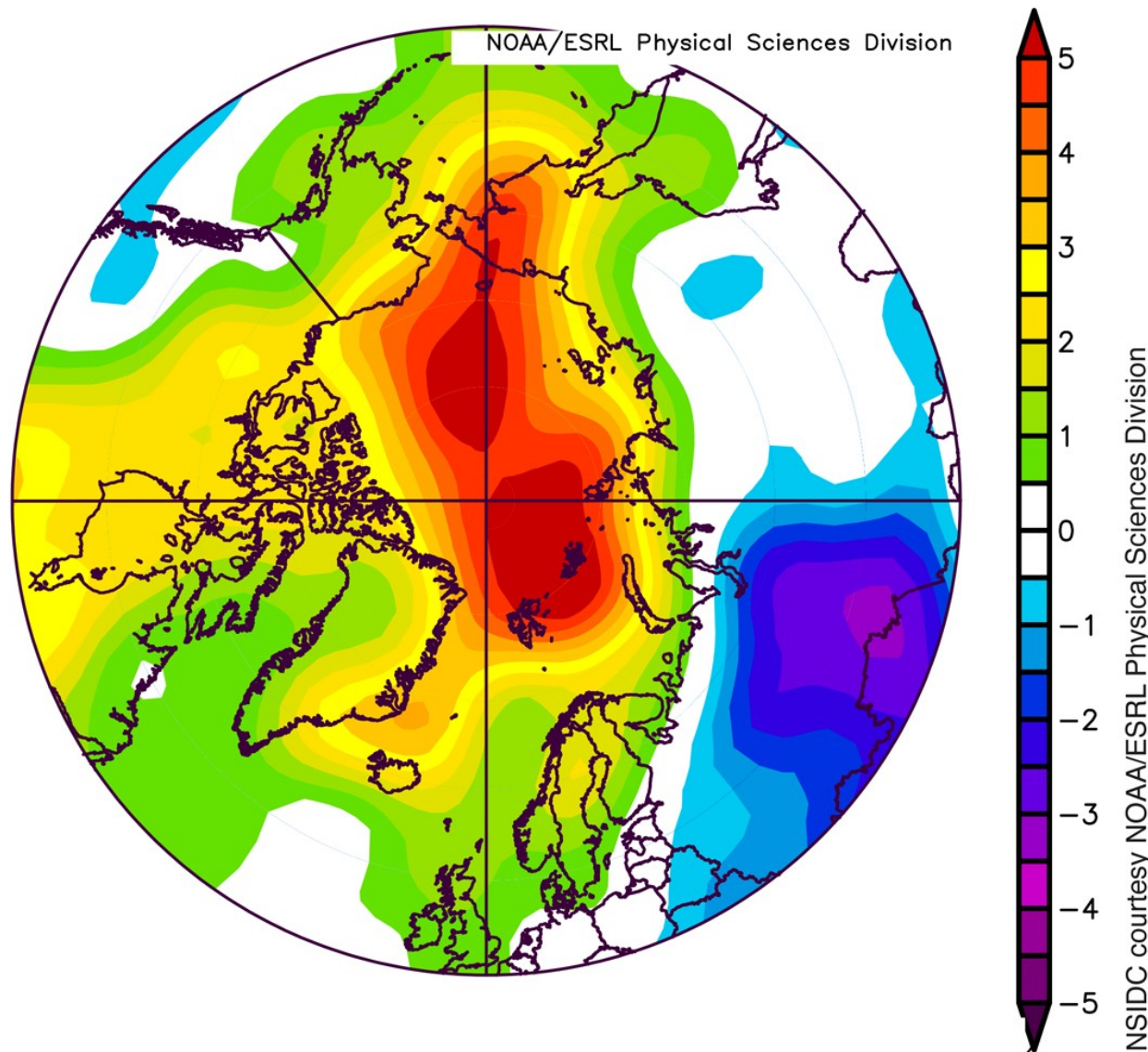


Zmiana temperatury zimą DJF spowodowana wymuszeniem radiacyjnym (dodatkowe długofalowe 30 W/m^2 w całej Arktyce), a) wiosną MAM, b) zimą DJF.

Najcieplejsza zima w historii pomiarów w Arktyce?

Arctic Air Temperature Difference

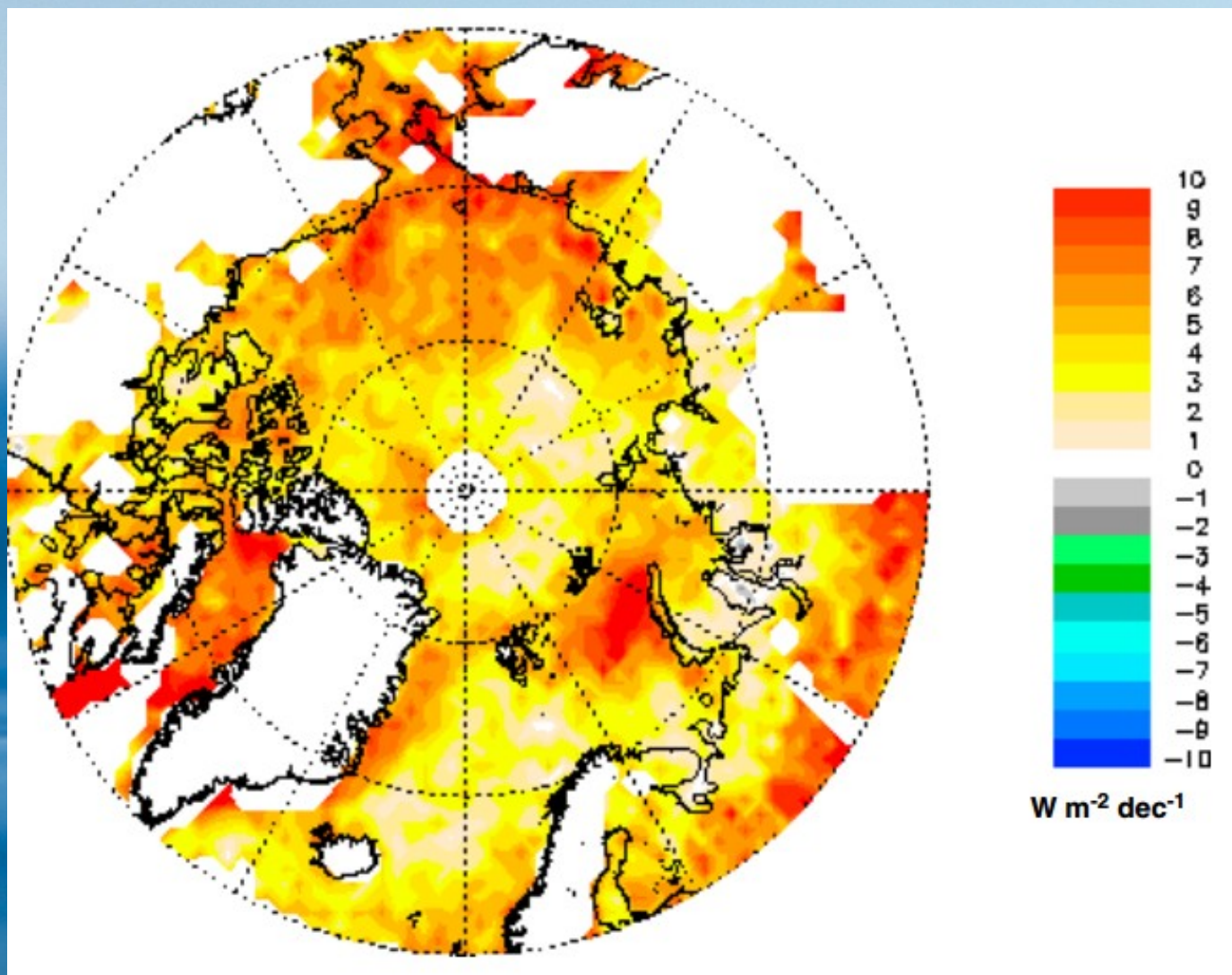
October 1, 2016 to February 28, 2017



Temperatury w Arktyce zimy (2016/17) były prawdopodobnie najcieplejsze w historii.

Największe anomalie temperatur występują w rejonach gdzie w wiosna i latem jest obecnie mniej lodu niż średnia z poprzednich dekad.

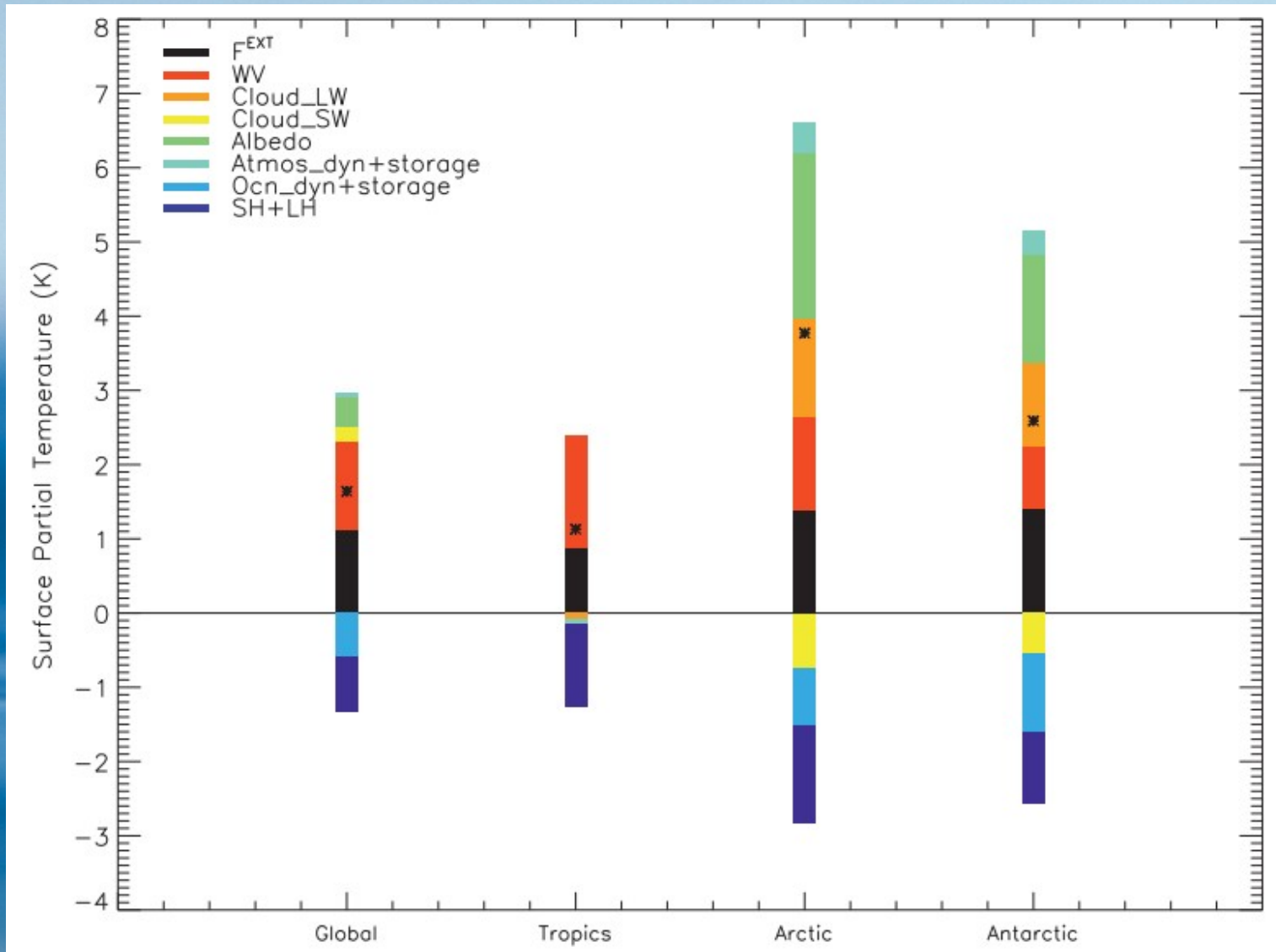
Kandydat: efekt zmian zachmurzenia



Trend zmian promieniowania długofalowego ($\text{W}/\text{m}^2/\text{dekadę}$) dochodzącego do powierzchni wiosną (MAM) dla lat 1980-2005, łączny efekt wzrostu ilości antropogenicznych gazów cieplarnianych, pary wodnej i zmian zachmurzenia.

Francis & Hunter 2007 (Environ. Res. Let.)

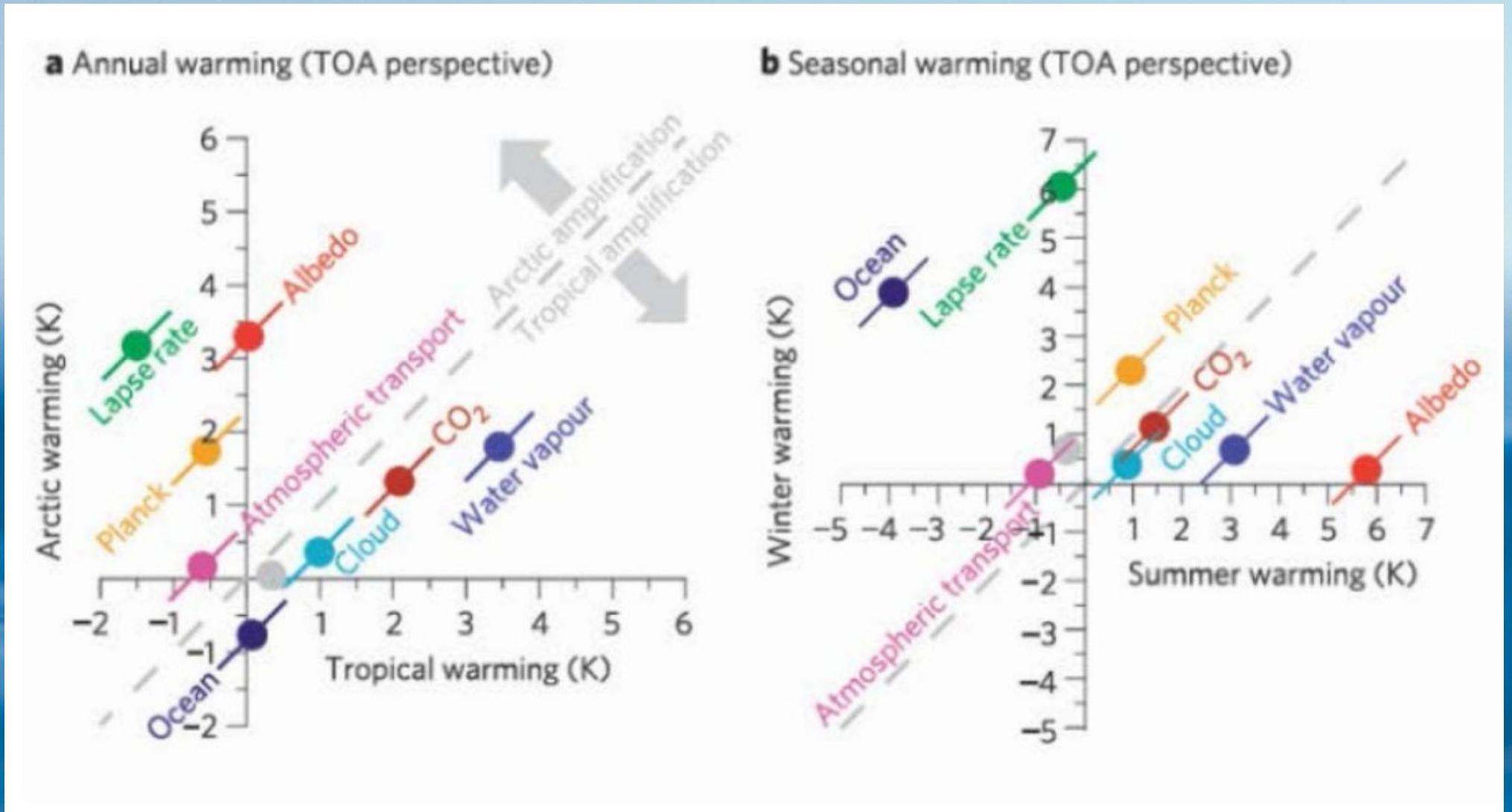
Próba rozłożenia “winy” za ocieplenie



F^{EXT} to bezpośrednie wymuszenie radiacyjne przy podwojeniu CO_2 , pozostałe elementy to sprzężenia zwrotne: WV to para wodna, SH+LH to strumienie ciepła wyczuwalnego i utajonego. Nie jest to pewnie ostatnie słowo ale obraz dzisiejszej wiedzy.

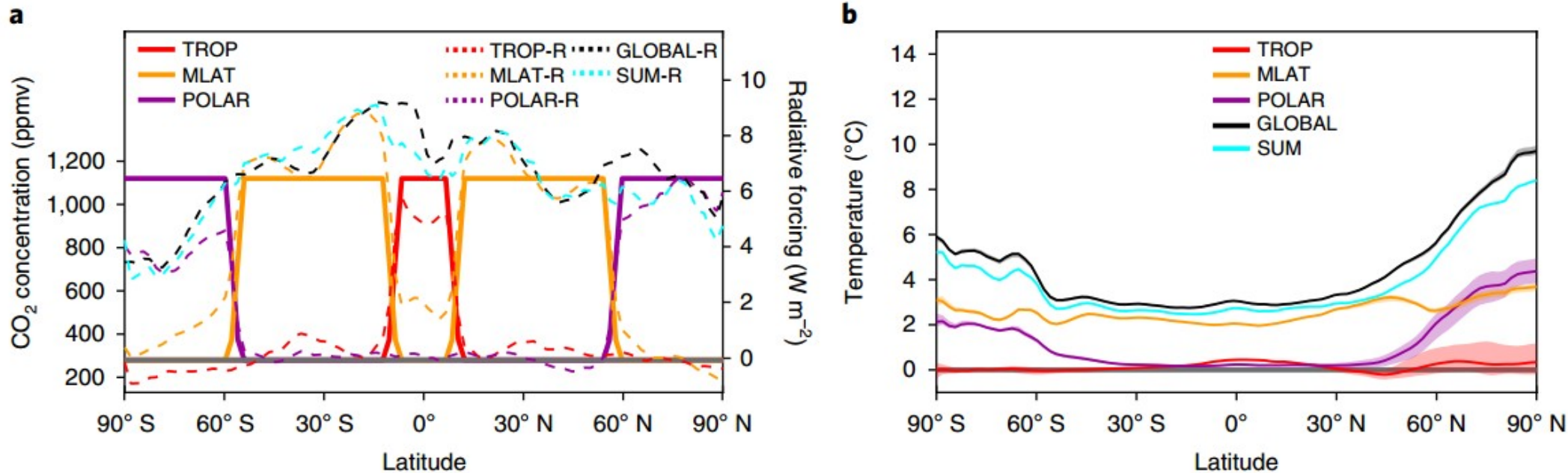
Taylor et al 2013 (J. Climate)

Próba rozłożenia “winy” za amplifikację



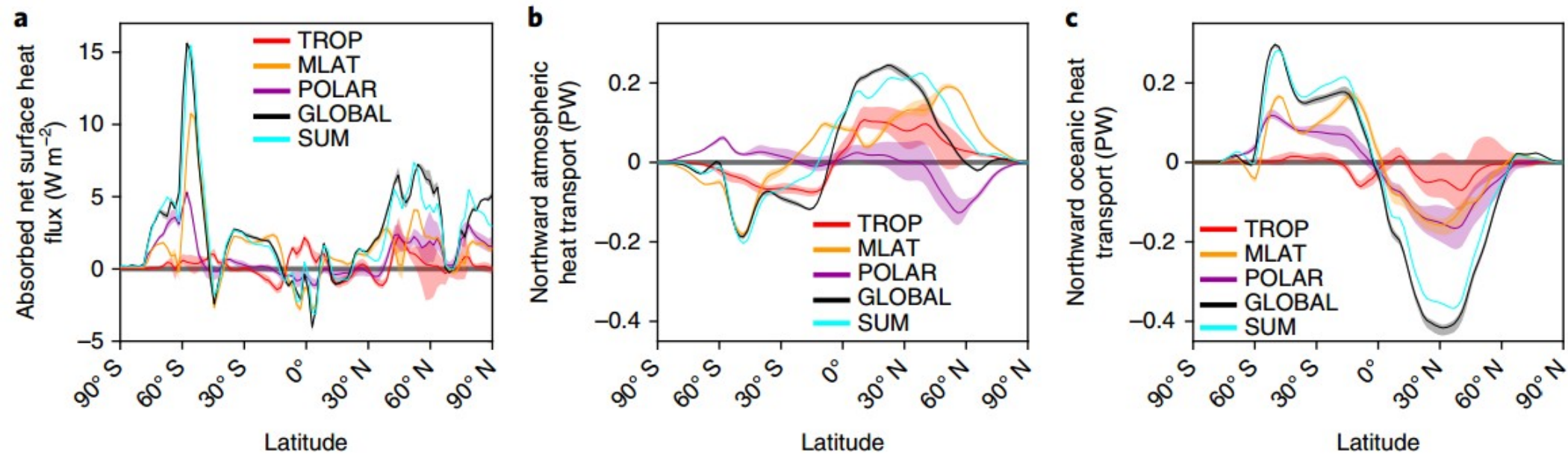
Warming contributions of individual feedback mechanisms calculated based on the difference between the last 30 years of the CMIP5 simulations. (a) Arctic (60°–90° N) versus tropical (30° S–30° N) warming from a TOA perspective. (b) Arctic winter (December–January–February) versus summer (June–July–August) warming.

Skąd bierze się “amplifikacja arktyczna” 1/2



W eksperymencie z modelem klimatycznym zastosowano wymuszenie CO₂ wyłącznie w tropikach TROP, szerokościach umiarkowanych MLAT i rejonach polarnych POLAR. Po lewej przedstawiono wymuszenia radiacyjne wynikłe z tego w funkcji szerokości geograficznej, a po prawej wpływ na temperaturę. Widać, że w rejonie Arktyki za ocieplenie odpowiada wymuszenie gazów cieplarnianych z szerokości umiarkowanych (adwekcja ciepła) oraz lokalne wymuszenie cieplarniane.

Skąd bierze się “amplifikacja arktyczna” 2/2



Od lewej: a) dodatkowe ciepło zaabsorbowane przez ocean, b) transport ciepła poprzez atmosferę (wartości dodatnie to transport na północ) i c) transport oceaniczny ciepła. Widać dodatkową “absorpcję” ciepła przez oceany w szerokościach umiarkowanych, zwiększenie transportu atmosferycznego i zmniejszenie (!) oceanicznego: efekt osłabienia cyrkulacji termohalinowej na północy i zwiększonego transportu Ekmana na południu. Za amplifikację arktyczną odpowiada (nie pokazane) prawie wyłącznie zwiększenie zimowej inwersji temperatur pod wpływem lokalnego efektu cieplarnianego.

Metabadanie prac naukowych

Table 1. Synthesis of physical mechanisms. For each of the mechanisms listed, N indicates the total number of studies that assessed the contribution of that mechanism to AA. The percentages of N that are positive (mechanism contributes to AA), negative (mechanism opposes AA), and positive or negative (mechanism either contributes to or opposes AA) are also given.

Physical mechanism	N	% +	% -	% \pm
CO ₂ forcing	29	34	48	18
Temperature feedbacks	34	100		
Planck response	23	100		
Lapse rate feedback	29	100		
Surface albedo feedbacks	81	100		
Sea ice albedo/insulation effects	66	100		
Other surface albedo feedbacks	35	100		
Cloud feedbacks	40	55	25	20
Water vapor feedbacks	37	32	62	6
Surface evaporation feedbacks	10	90		10
Biosphere feedbacks	8	88		12
Atmospheric PET changes	78	78	8	14
Oceanic PET changes	28	75	11	14

O ile autorzy prac na temat amplifikacji arktycznej (AA) zgadzają się do do znaczenia lokalnego efektu cieplarnianego (Planck response & Lapse rate feedback) oraz znaczenia ubytku powierzchni pokrytej lodem to consensus jest już mniejszy w wypadku transportu ciepła do Arktyki (PET), zarówno atmosferycznego jak i oceanicznego.

Previdi, Smith & Polvani 2021 (ERL)

Konkluzje

- Klasyczna hipoteza Arrheniusa o wpływie zmian albedo na wielkość zmian temperatury przy danym wymuszeniu zasadniczo broni się (choć z pewnymi korektami).
- Wymuszenia zmieniające zasięg lodu w Arktyce (a zatem i albedo) są podobne jak globalne ale zmodyfikowane temperaturą Północnego Atlantyku (indeksem AMO).
- Arktyczna amplifikacja wzmocniona jest szeregiem sprzężeń zwrotnych wywołanych ubytkiem lodu: pionową strukturą temperatury w atmosferze (inwersja), zmianami zachmurzenia, efektem cieplarnianym pary wodnej, większym mieszaniem wód oceanicznych, a także (prawdopodobnie) większą adwekcją oceaniczną i atmosferyczną (szczególnie ciepła utajonego).
- Analogiczne procesy nie działają wokół Antarktydy, gdyż długo nie zmieniła się tam zasięg lodu. Jednak niedawny jego spadek powinien zapoczątkować podobny proces.

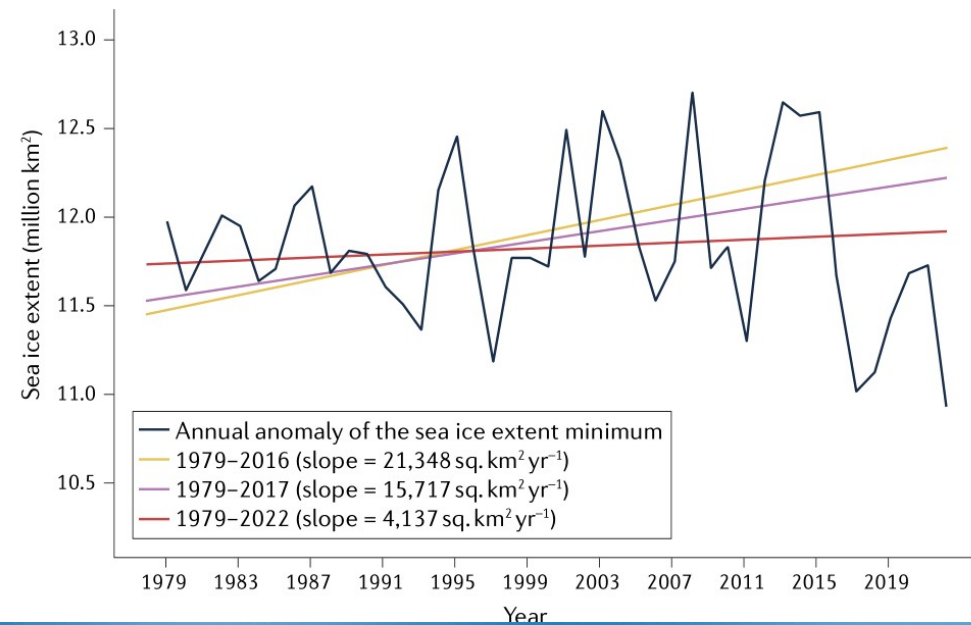
Comment | [Published: 10 March 2022](#)

A new record minimum for Antarctic sea ice

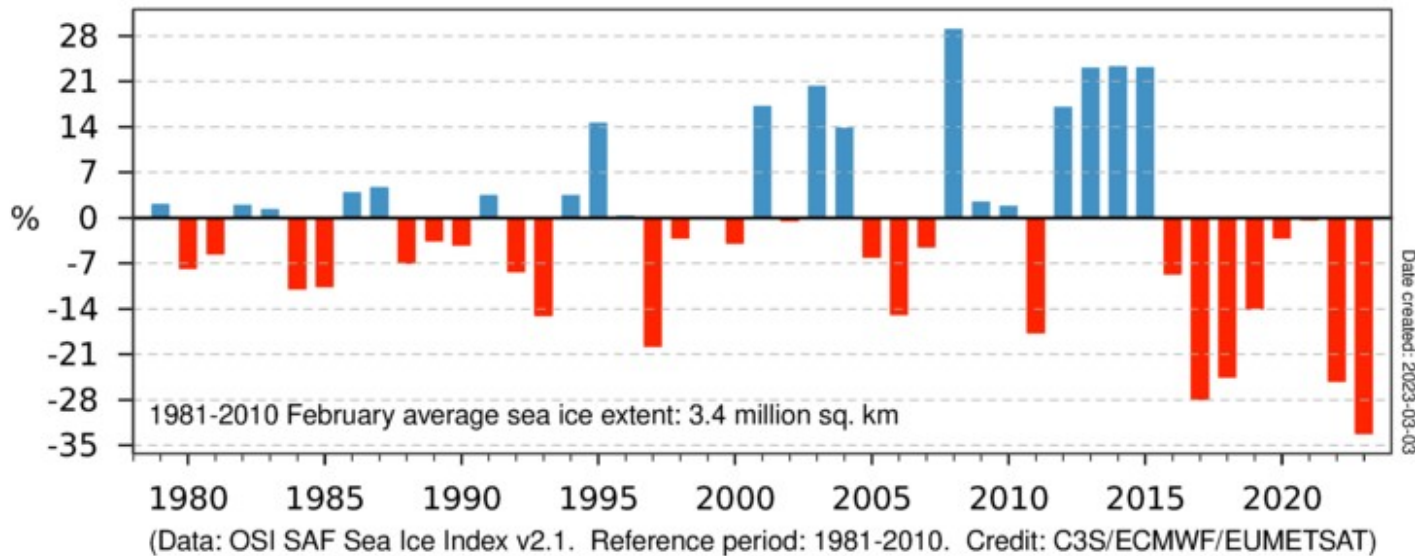
[Marilyn N. Raphael](#)  & [Mark S. Handcock](#)

[Nature Reviews Earth & Environment](#) **3**, 215–216 (2022) | [Cite this article](#)

a Sea ice extent anomaly



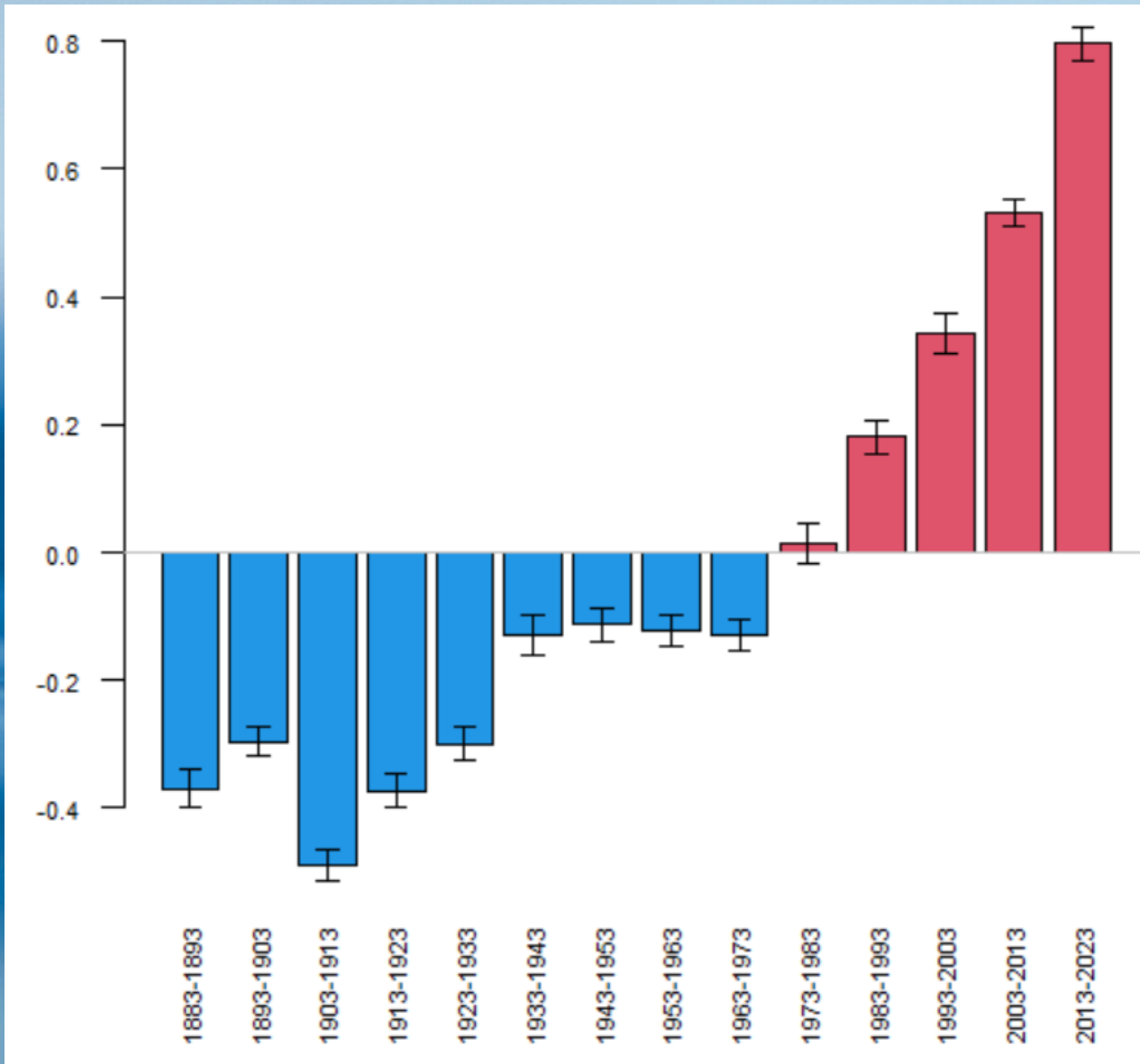
February Antarctic sea ice extent anomalies



PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION



Globalne ocieplenie się nie zatrzymało



Anomalie temperatury (globalna seria GISS) dla dekad (do kwietnia 2023) w stosunku do okresu bazowego 1961-1990 z zaznaczeniem niepewności statystycznej (2σ).

Arctic Sea Ice
Minimum Extent
4.67 Million km²
September 18, 2022

Yellow line: 1981-2010 Avg Min

Dziękuję za u

