

Изменения климата в Арктике и их механизмы

В.А. Семенов

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Институт географии РАН

vasemenov@ifaran.ru

Содержание

- Почему важны изменения климата в Арктике?
- Что такое «быстрые изменения климата в Арктике»?

Температура

Морской лед

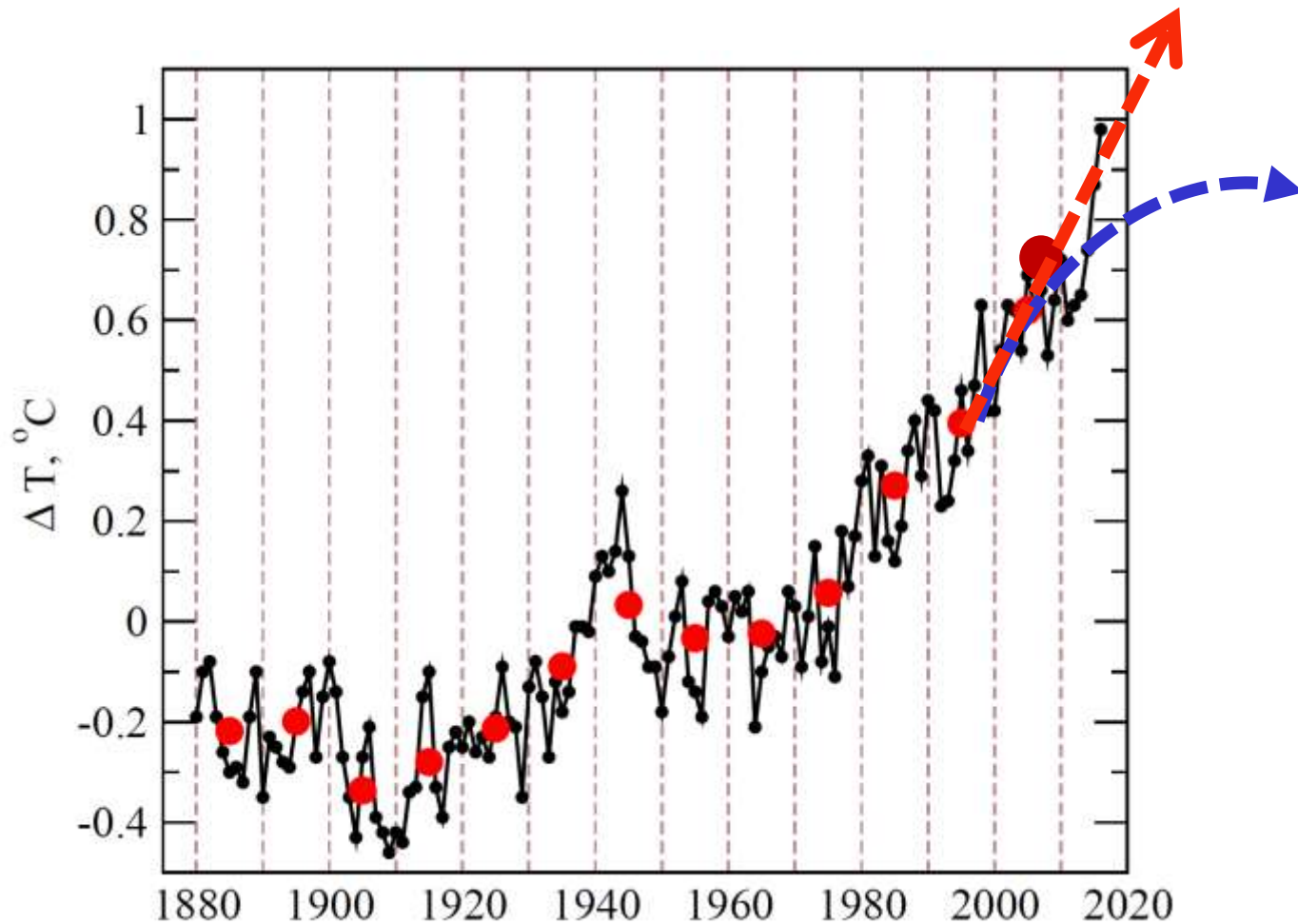
Атмосферная циркуляция

- Механизмы быстрых изменений климата: положительные обратные связи
- Выводы

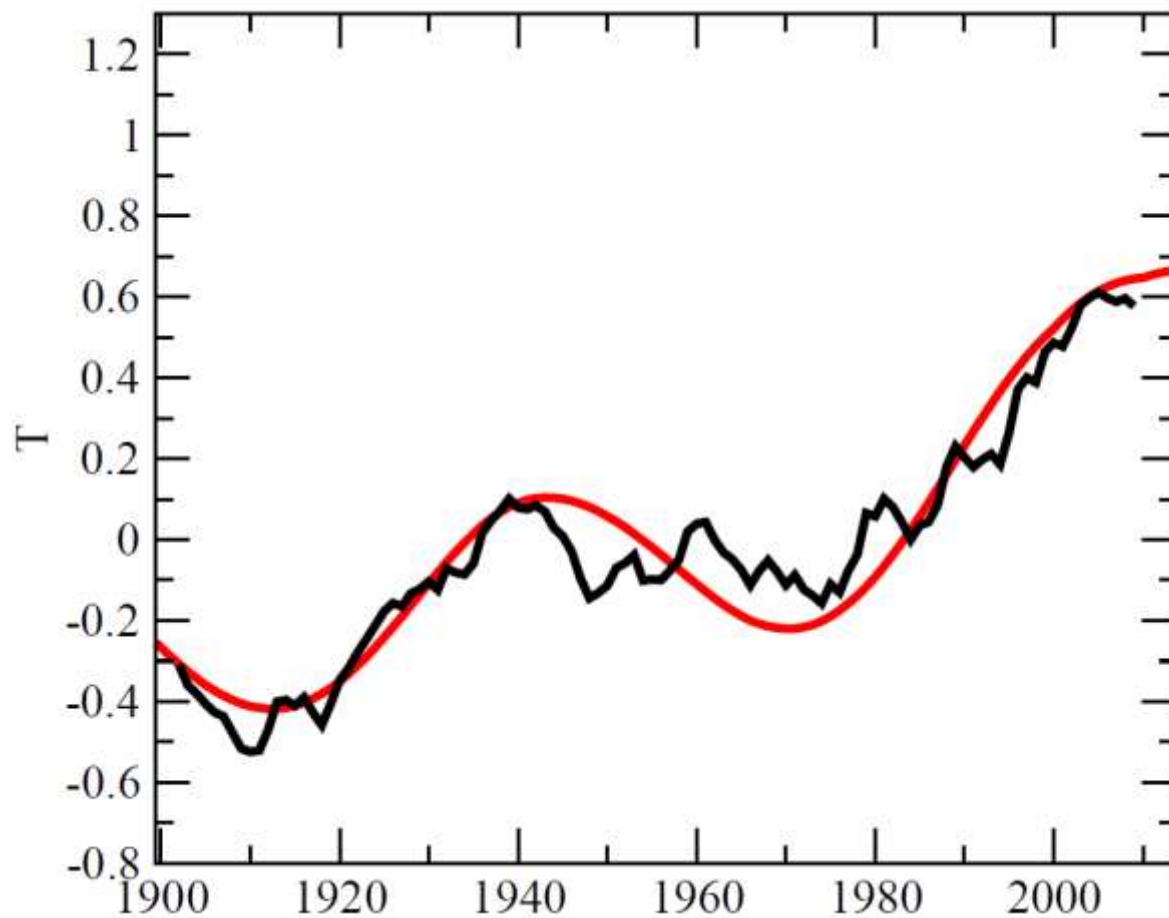
Почему исследования изменения климата в Арктике являются важной отдельной проблемой в науке о климате?

1. Климатические процессы в Арктике оказывают существенное влияние на климат Северного полушария
2. Климатические процессы в Арктике во значительной степени формируют режим атмосферной циркуляции и погоду в средних широтах Северного полушария («Арктика – кухня погоды»)
3. Изменения климата в Арктике проявляются значительно сильнее, чем в среднем по планете («арктическое усиление»)
Арктика – чувствительный индикатор глобальных изменений климата

Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры Северного полушария ($^{\circ}\text{C}$) по данным GISS <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

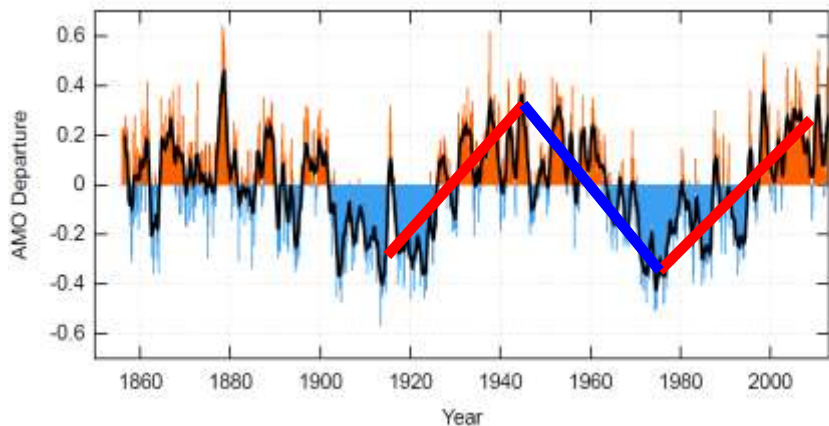


Изменения климата как суперпозиция антропогенного тренда и естественных колебаний климата

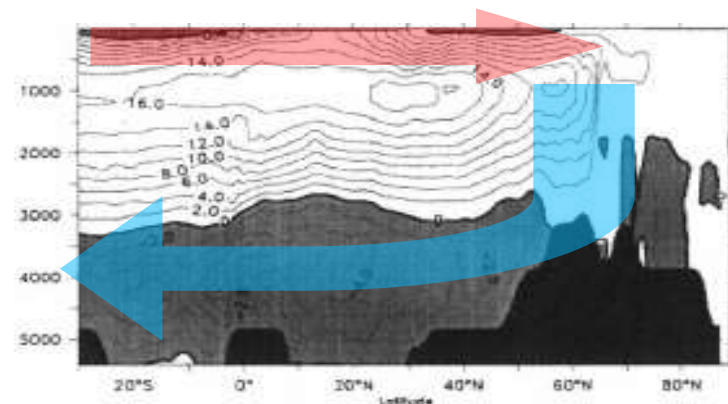


Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО): причина долгопериодных квазициклических колебаний климата

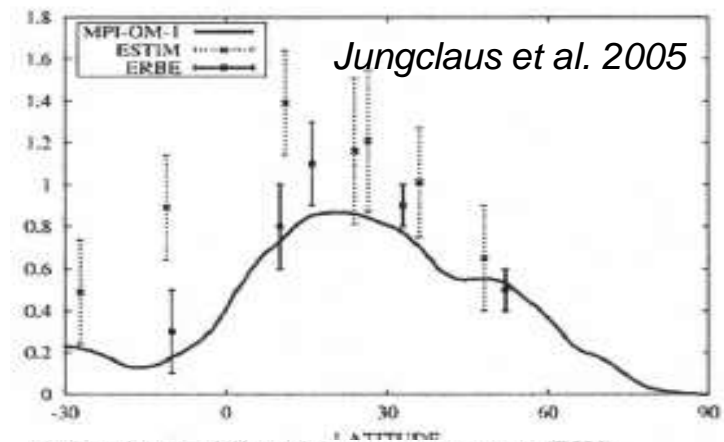
AMO index: detrended SST variations in the NA, °C



Meridional cross-section of oceanic circulation

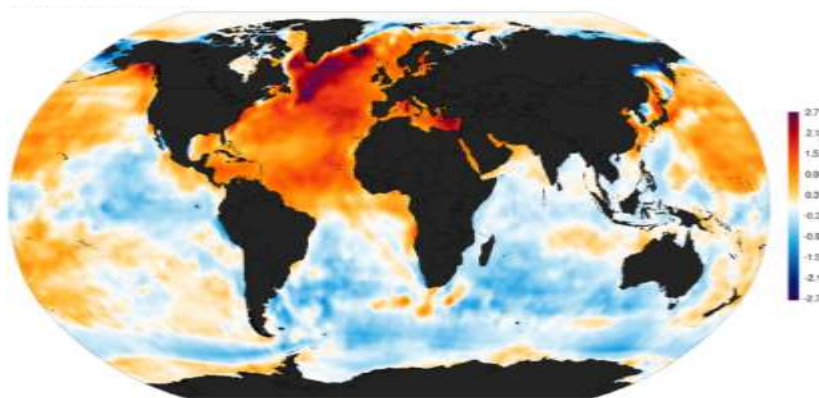


Atlantic meridional overturning streamfunction



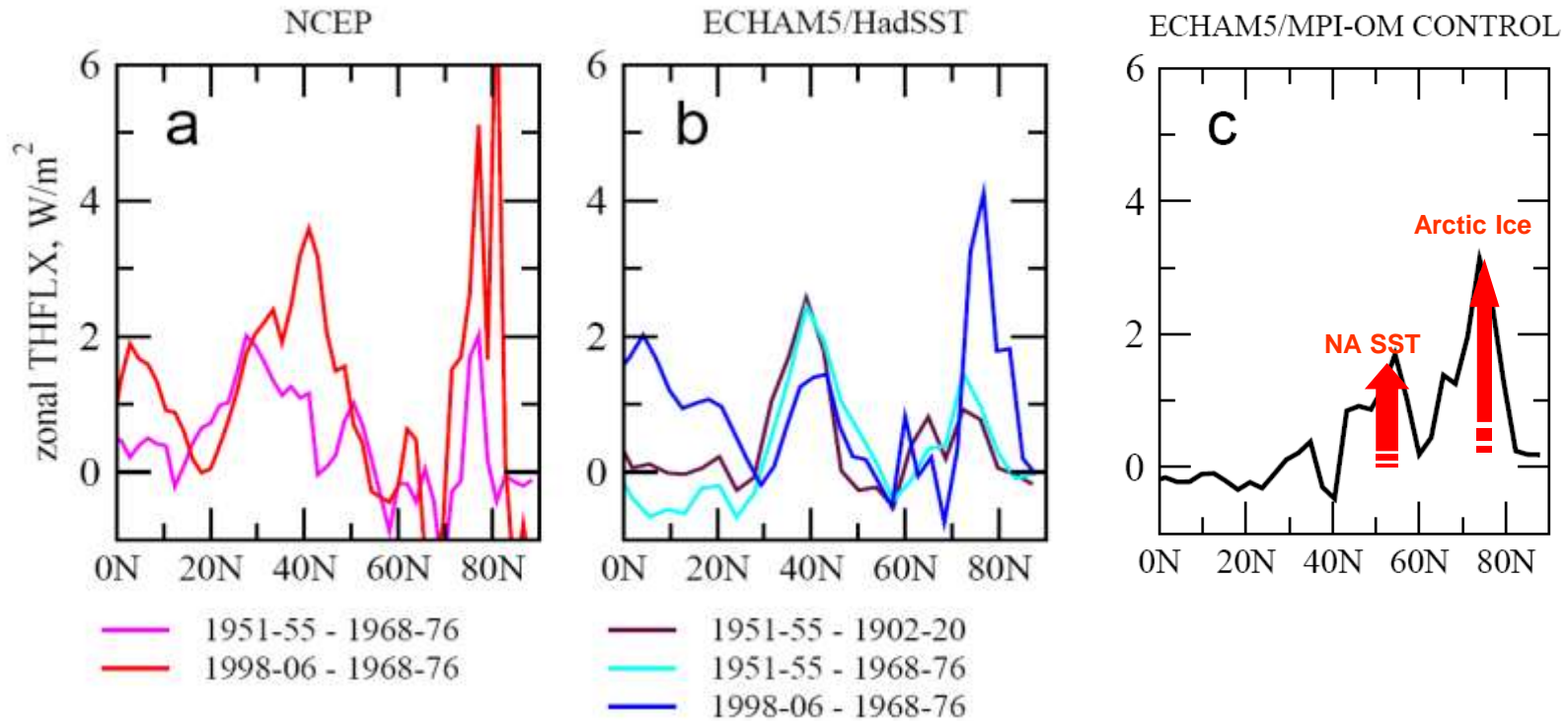
Ocean heat transport in the North Atlantic (PW)

Ocean temperature anomalies related to AMO (°C)

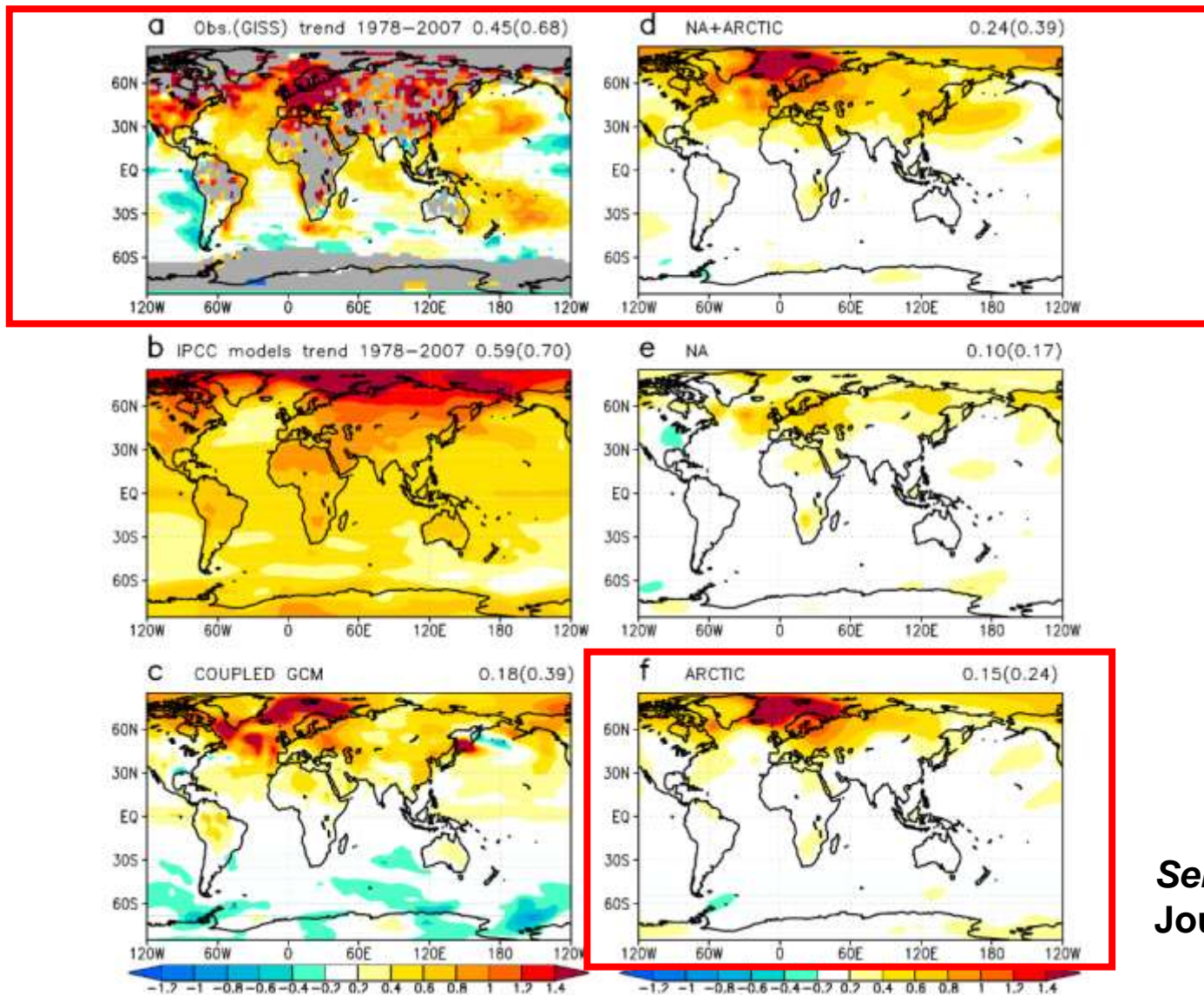


Широтная структура аномальных потоков тепла из океана в атмосферу, связанных с АМО

Zonally averaged turbulent heating
in the Atlantic Sector (80W-90E) associated with the AMV



Моделирование воздействия АМО на глобальный климат



*Semenov et al., 2010,
Journal of Climate*

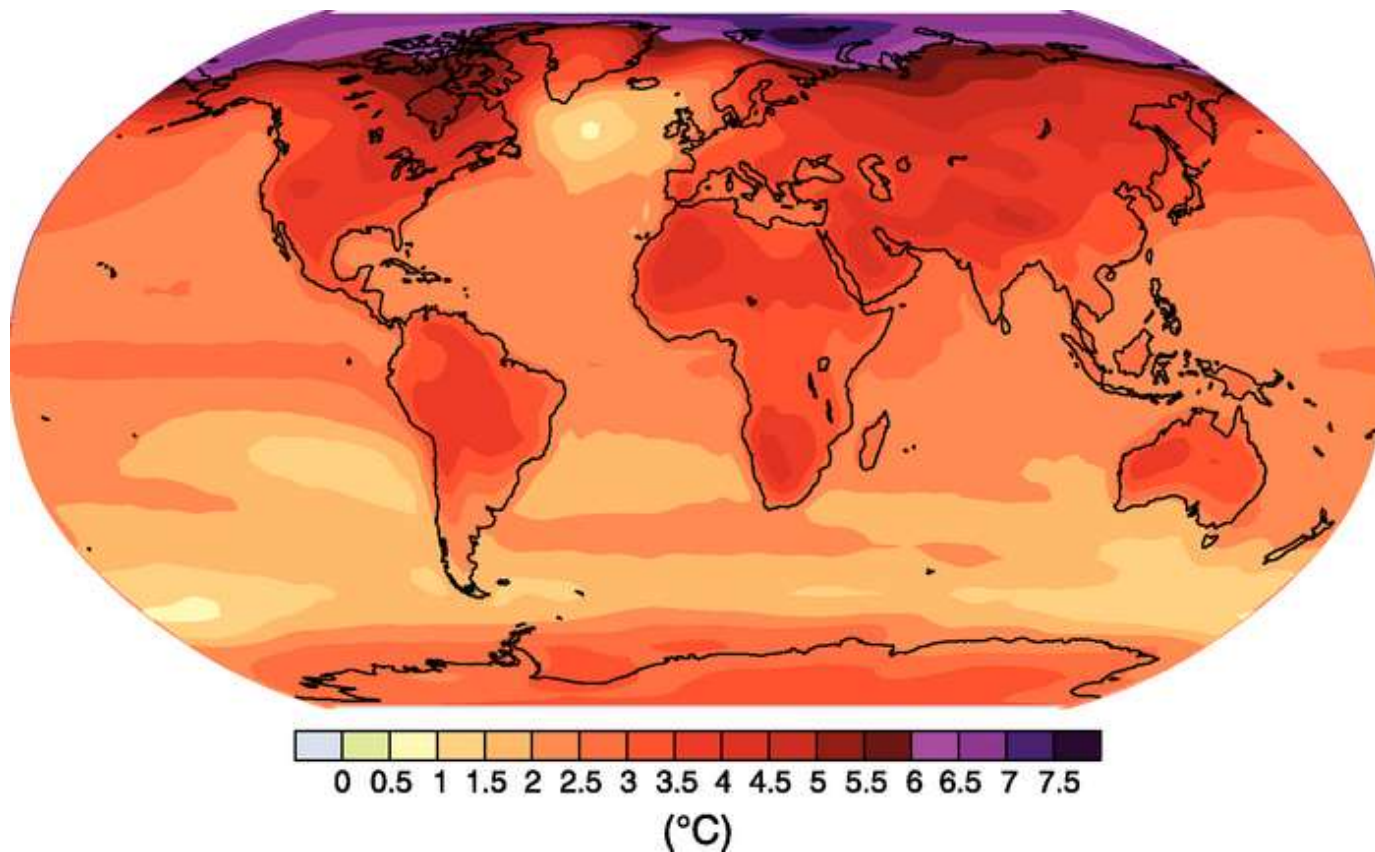
Изменения приземной температуры, связанные с АМО (в °С в % от наблюдаемого тренда) для СП, ЮП и для планеты в целом по результатам экспериментов с моделью ECHAM5/MLO

| | СП | ЮП | ГЛОБ |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| АТЛ+Арк | 0.39 (57%) | 0.08 (36%) | 0.24 (53%) |
| АТЛ | 0.17 (25%) | 0.04 (18%) | 0.10 (22%) |
| Арк | 0.24 (35%) | 0.06 (27%) | 0.15 (33%) |
| Набл.* | 0.68 | 0.22 | 0.45 |

* тренд в 1978-2007 гг., данные GISS

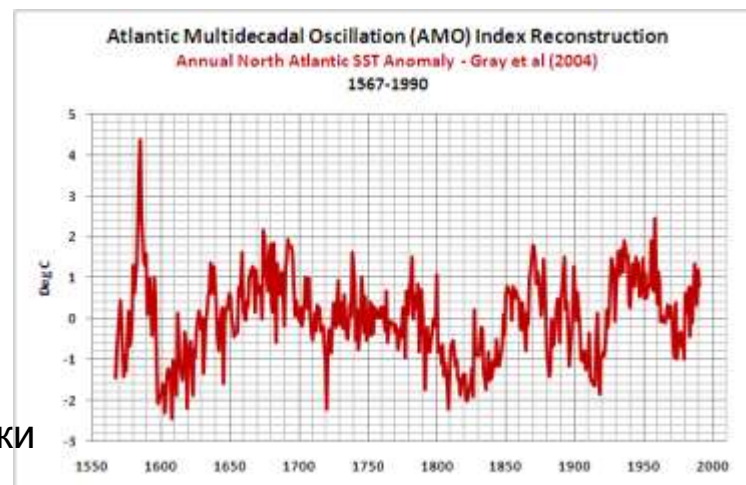
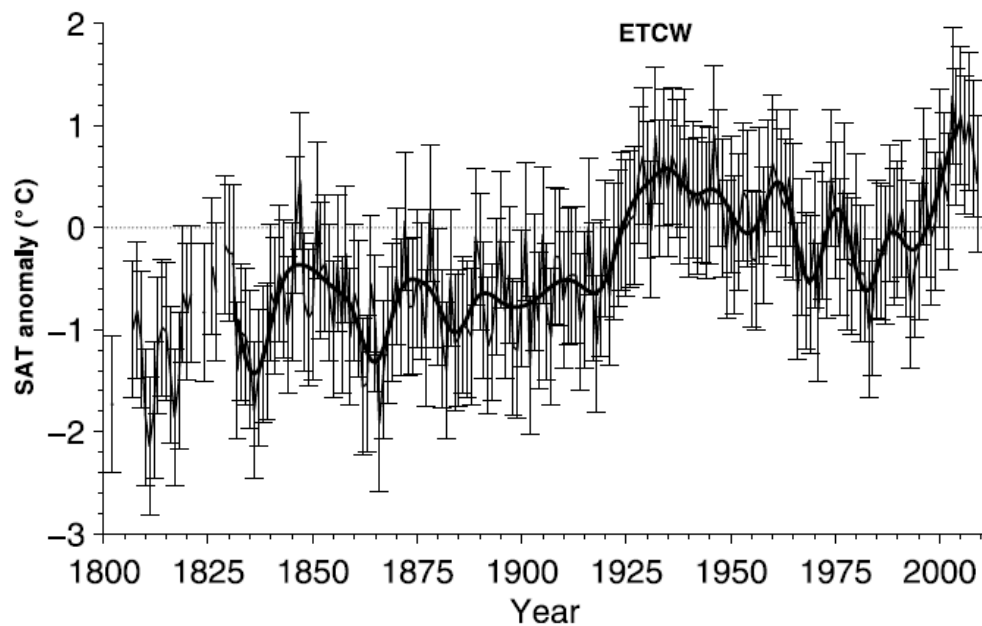
Учет потоков, связанных с АМО в Арктике удваивает величину вклада АМО в изменения температуры Северного полушария в последние 30 лет

Изменения среднегодовой приземной температуры к концу 21 века по данным моделей IPCC AR4



Существуют ли «циклы» в Арктике?

Аномалии температуры в атлантическом секторе Арктики



Wood et al., 2010, GRL

Изменения циркуляции атмосферы, связанные с потеплением в Арктике

Изменения приземной температуры зимой при сокращения площади морских льдов, °C

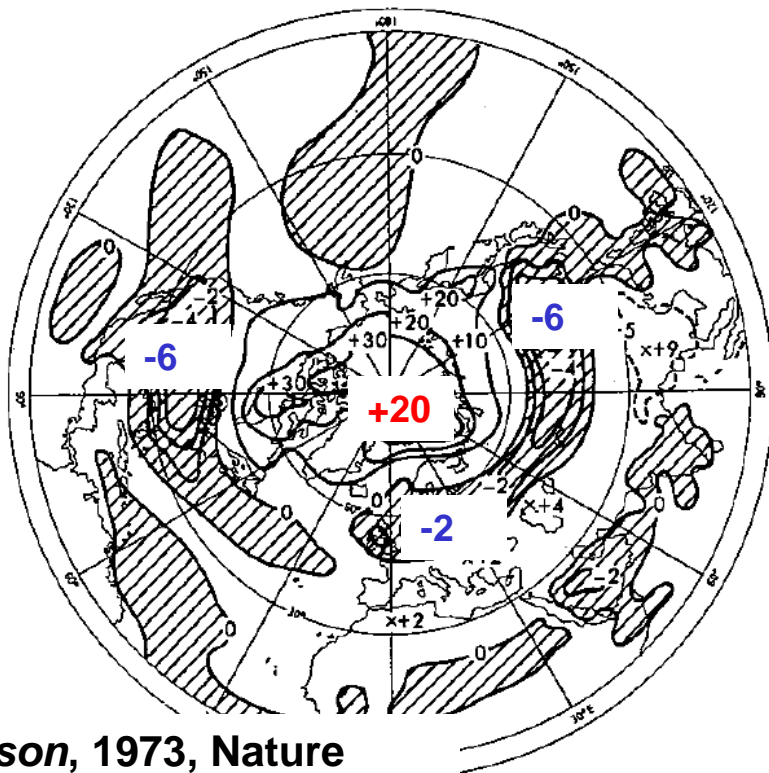
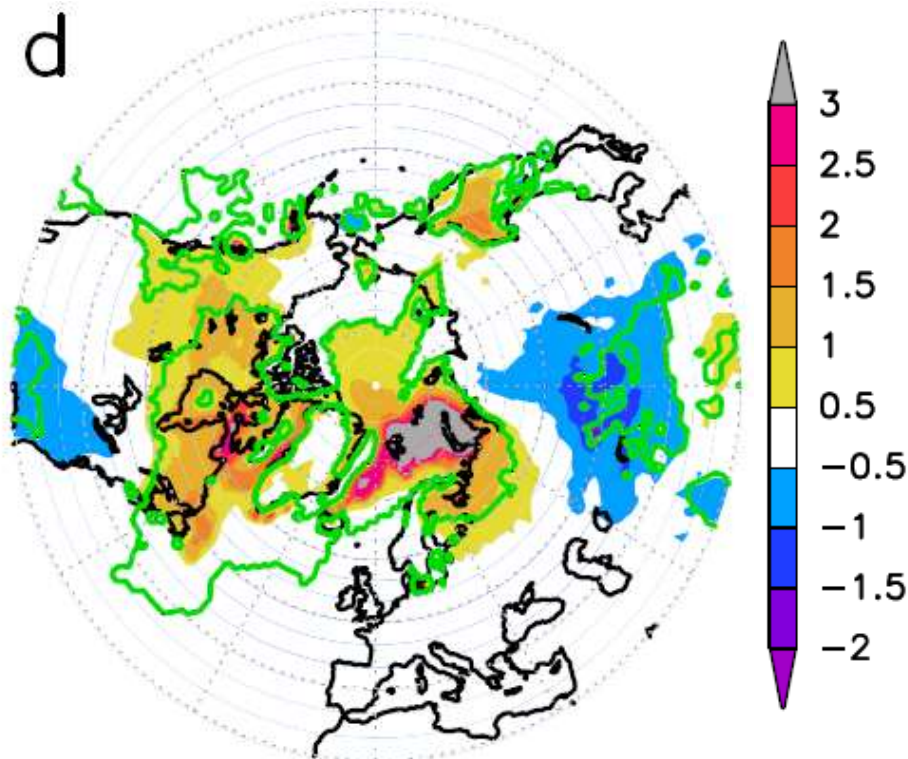
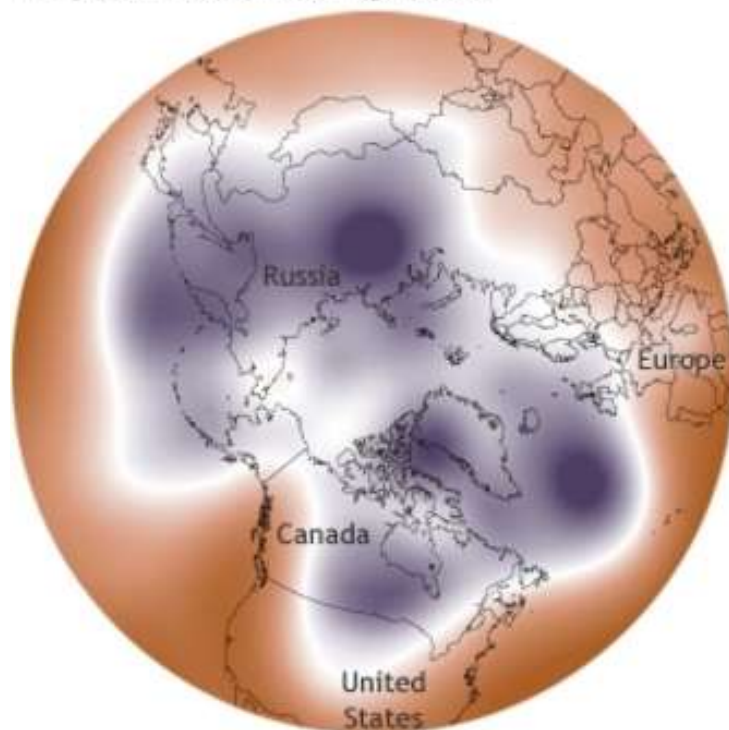


Fig. 1 Temperature differences, in °C near the model surface, between the computation with an ice-free arctic and the computation with ice at the mean climatological position. Hatched areas indicate regions of cooling in the ice-free experiment.



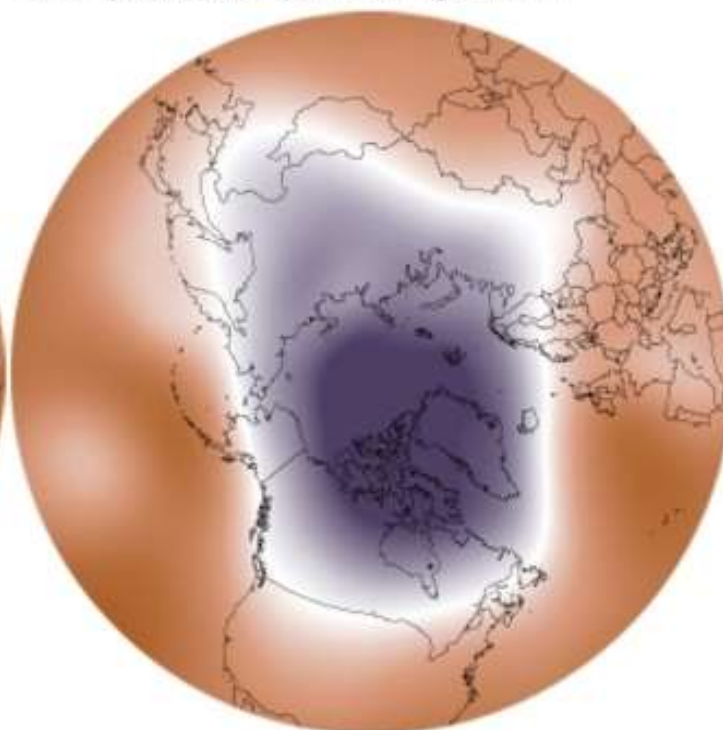
Изменения циркуляции атмосферы, связанные с потеплением в Арктике

Wavy polar vortex configuration



January 5, 2014

More typical, compact configuration



November 14-16, 2013

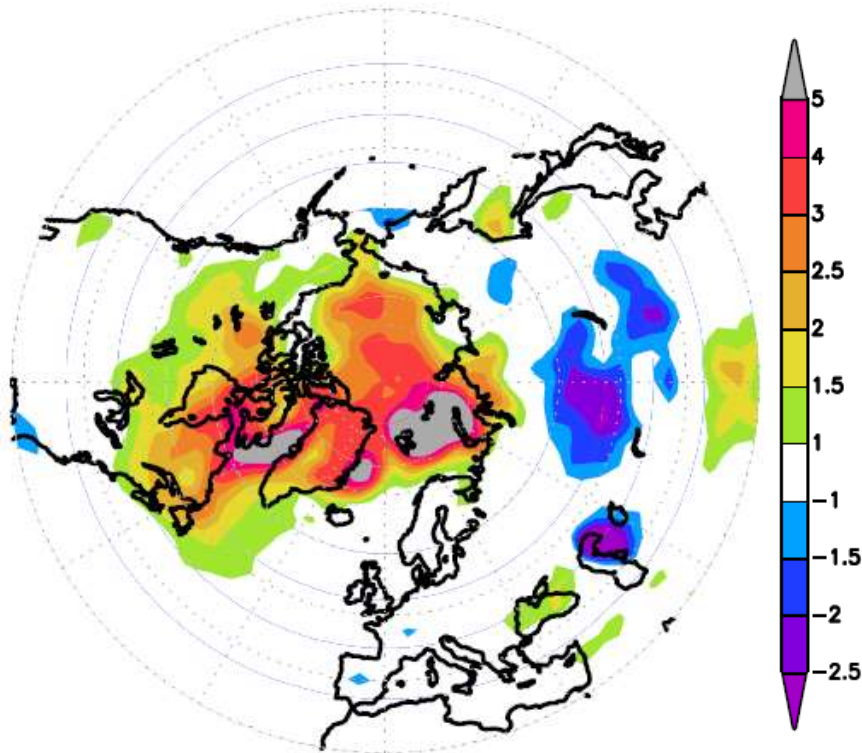


Cohen et al., 2014, Nature Geoscience

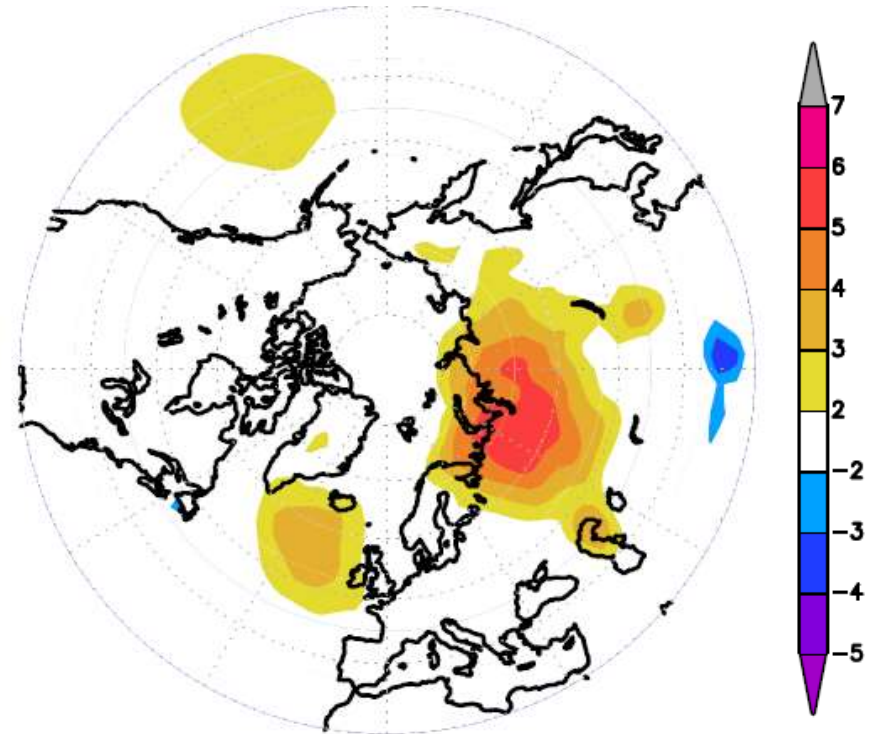
Изменения атмосферной циркуляции в начале 21 века

Аномалии зимней температуры и давления для периода 2005-2012 гг.
(данные реанализа NCEP)

T, °C



P, hPa



“Hot Arctic – Cold Continent”

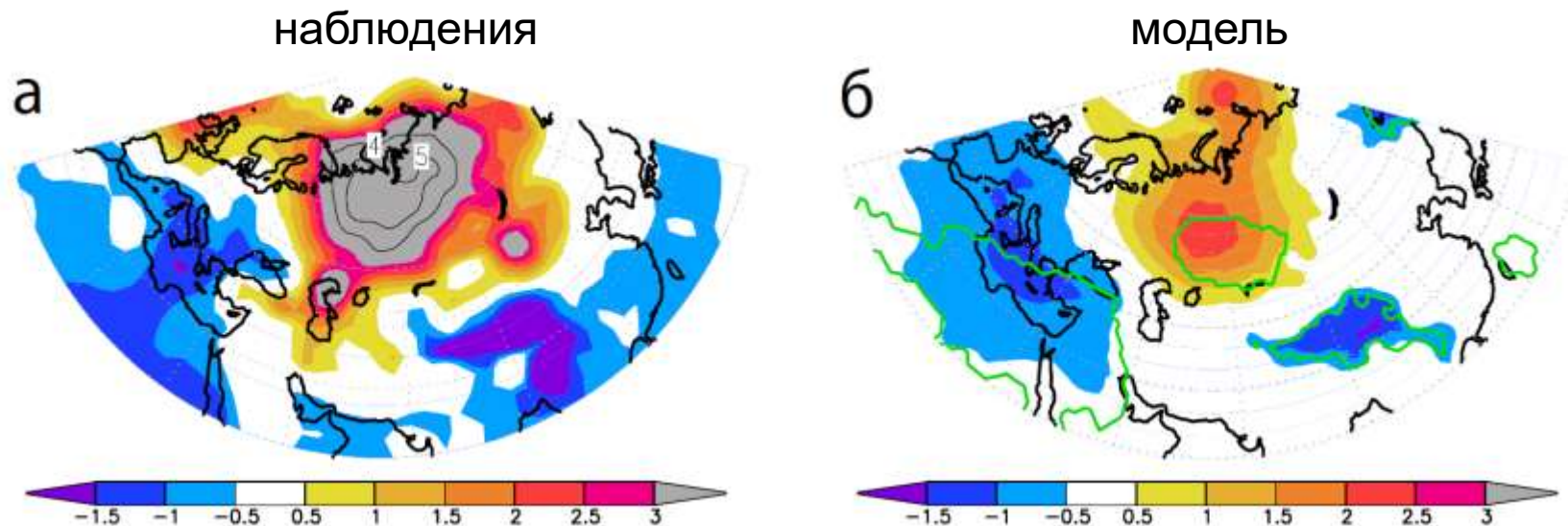
“Barents Anti-cyclone”

Semenov and Latif 2015, ERL

Изменения атмосферной циркуляции в начале 21 века

Результаты численных экспериментов с глобальной моделью атмосферы при задании аномалий площади морских льдов для периода холодных зим 2005-2012

Зимние аномалии давления воздуха, гПа

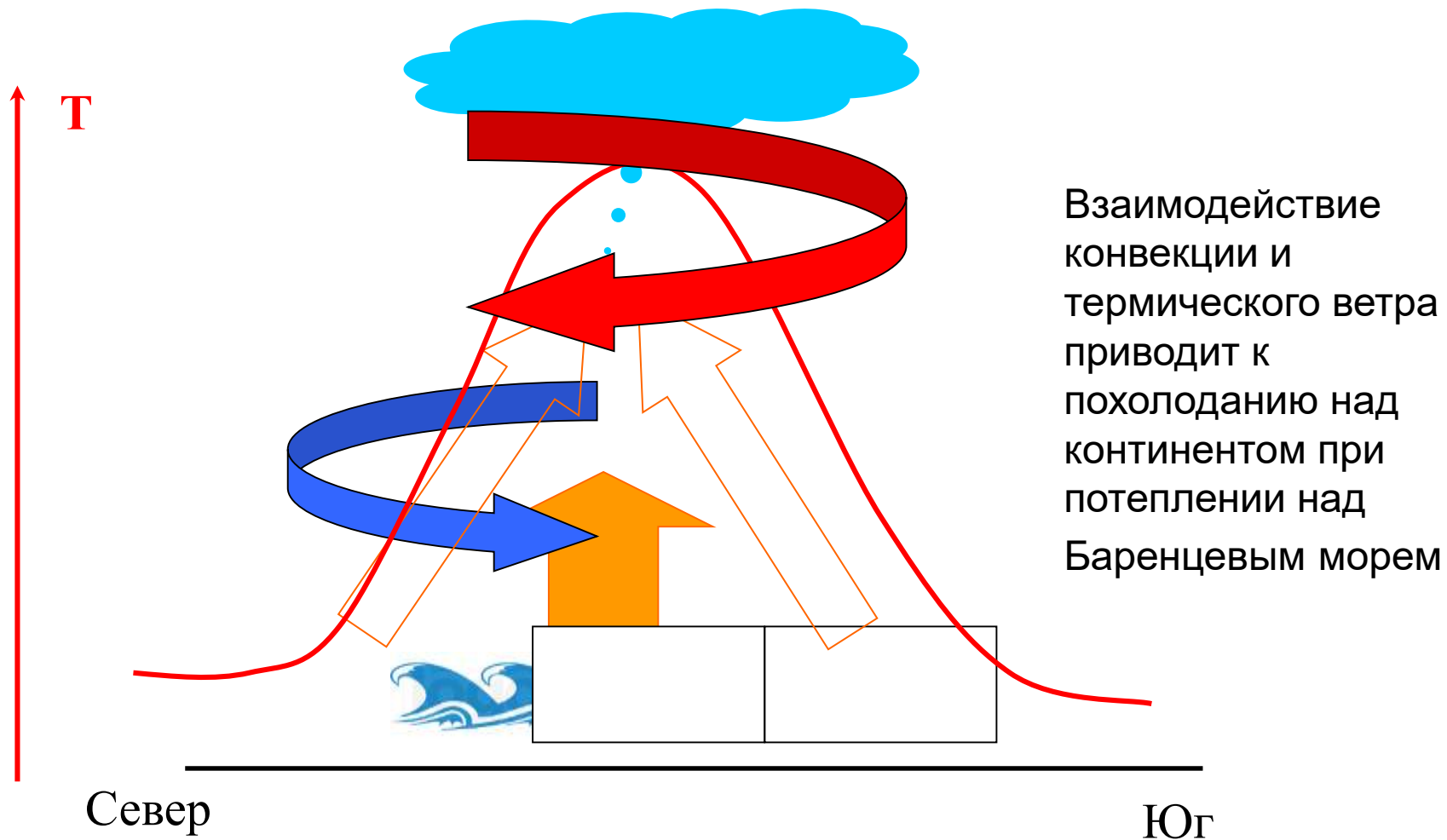


Semenov and Latif, 2015; Мохов, Семенов, 2016

Уральский блокинг и зимние морозы могут быть результатом сокращения площади морских льдов в Баренцевом море

Изменения атмосферной циркуляции в начале 21 века

Механизм нелинейного отклика



Petoukhov and Semenov, 2010; Мохов, Семенов, 2016

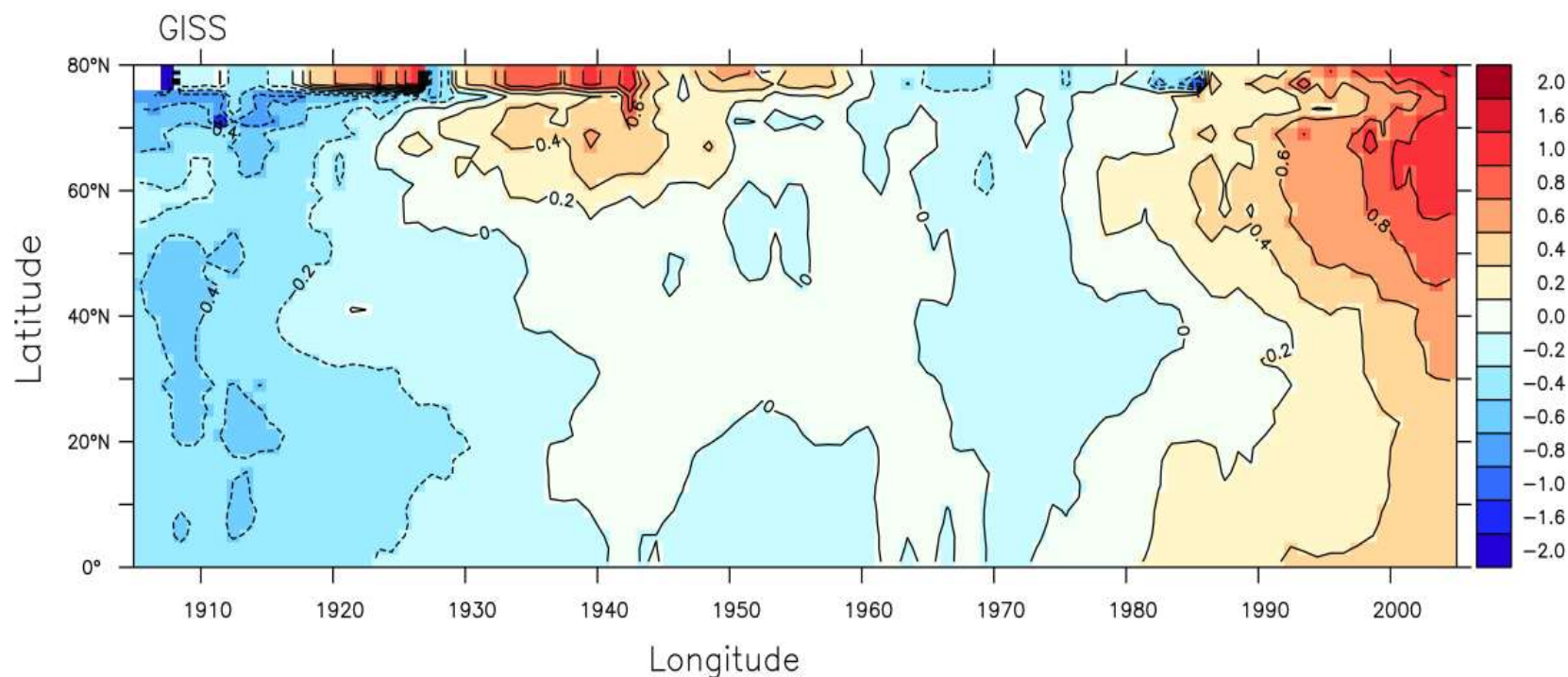
Арктика является активным компонентом земной климатической системы. Изменения температуры в Арктике, определяя перепад температур экватор-полюс, влияя на межширотный перенос тепла и глобальную температуру.

Аномальный нагрев атмосферы Арктики приводит к изменению циркуляции атмосферы высоких и средних широт СП, в том числе субполярного струйного течения, полярного вихря в стратосфере, влияя на формирование погодных аномалий в средних широтах СП.

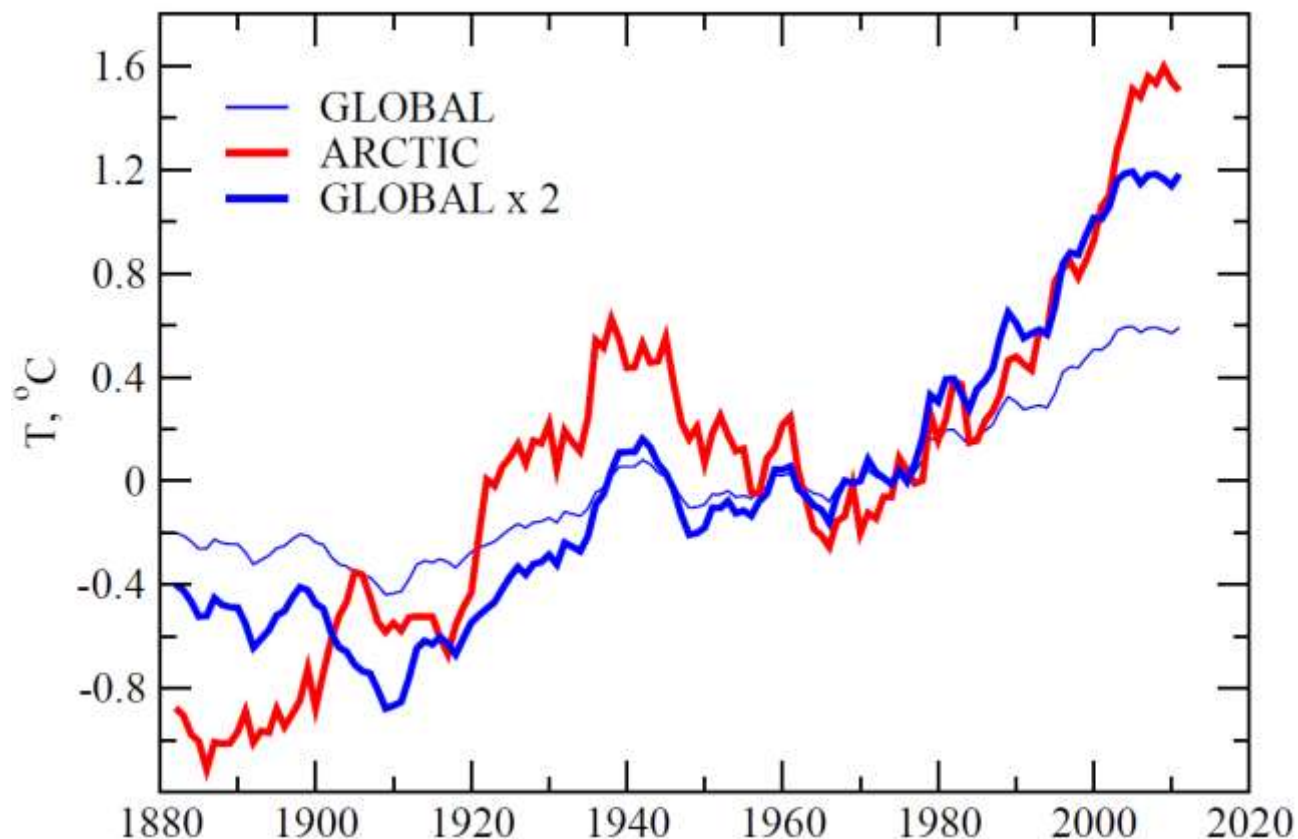
Отклик атмосферной циркуляции на потепление в Арктике и сокращение площади морских льдов нелинейен!

Арктическое усиление глобального потепления

Зональные аномалии среднегодовой приземной температуры в СП, °С



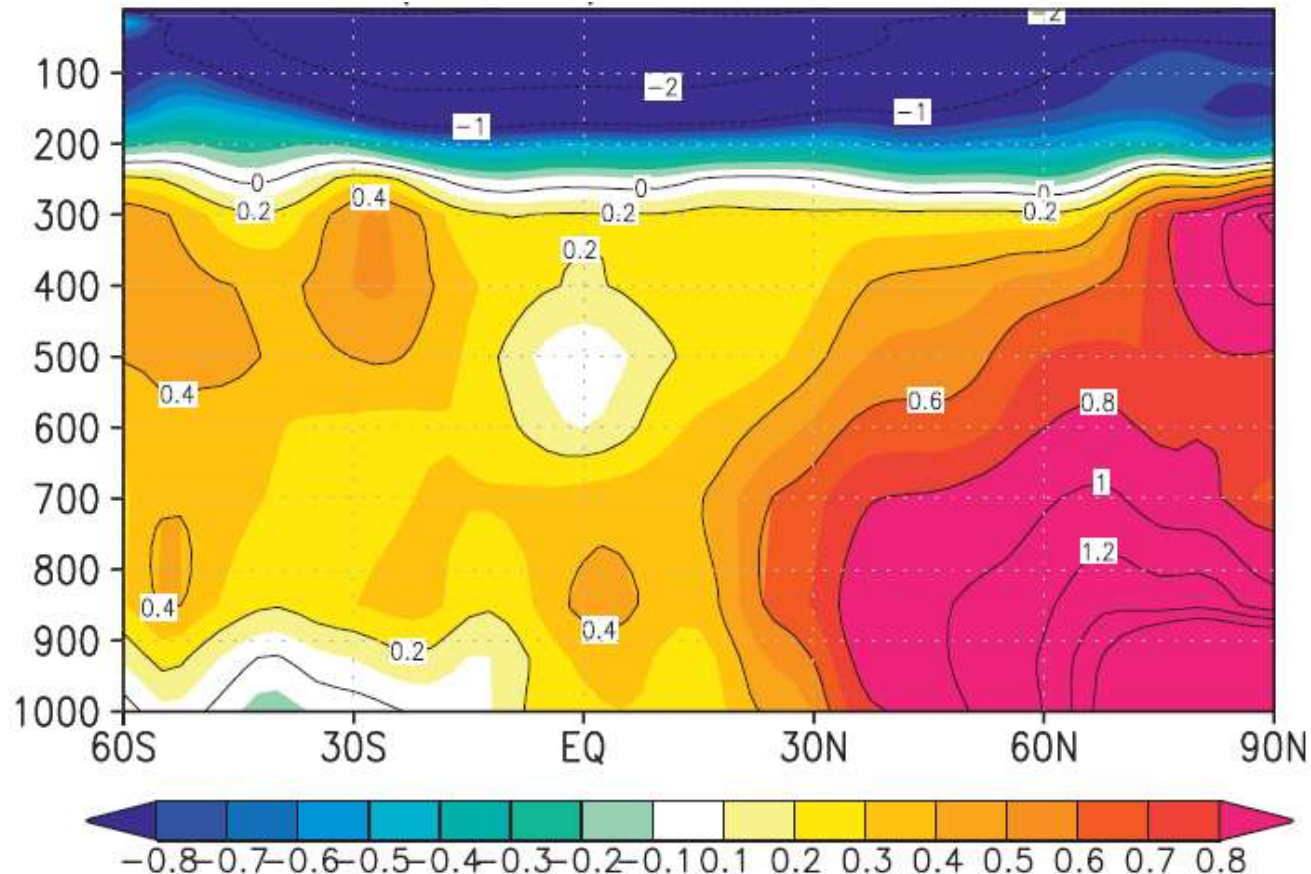
Изменения **глобальной** и **арктической** среднегодовой температуры



- **Арктическое усиление изменений климата**
- **Роль внутренней изменчивости**
- **Нелинейность связи между глобальными и арктическими изменениями**

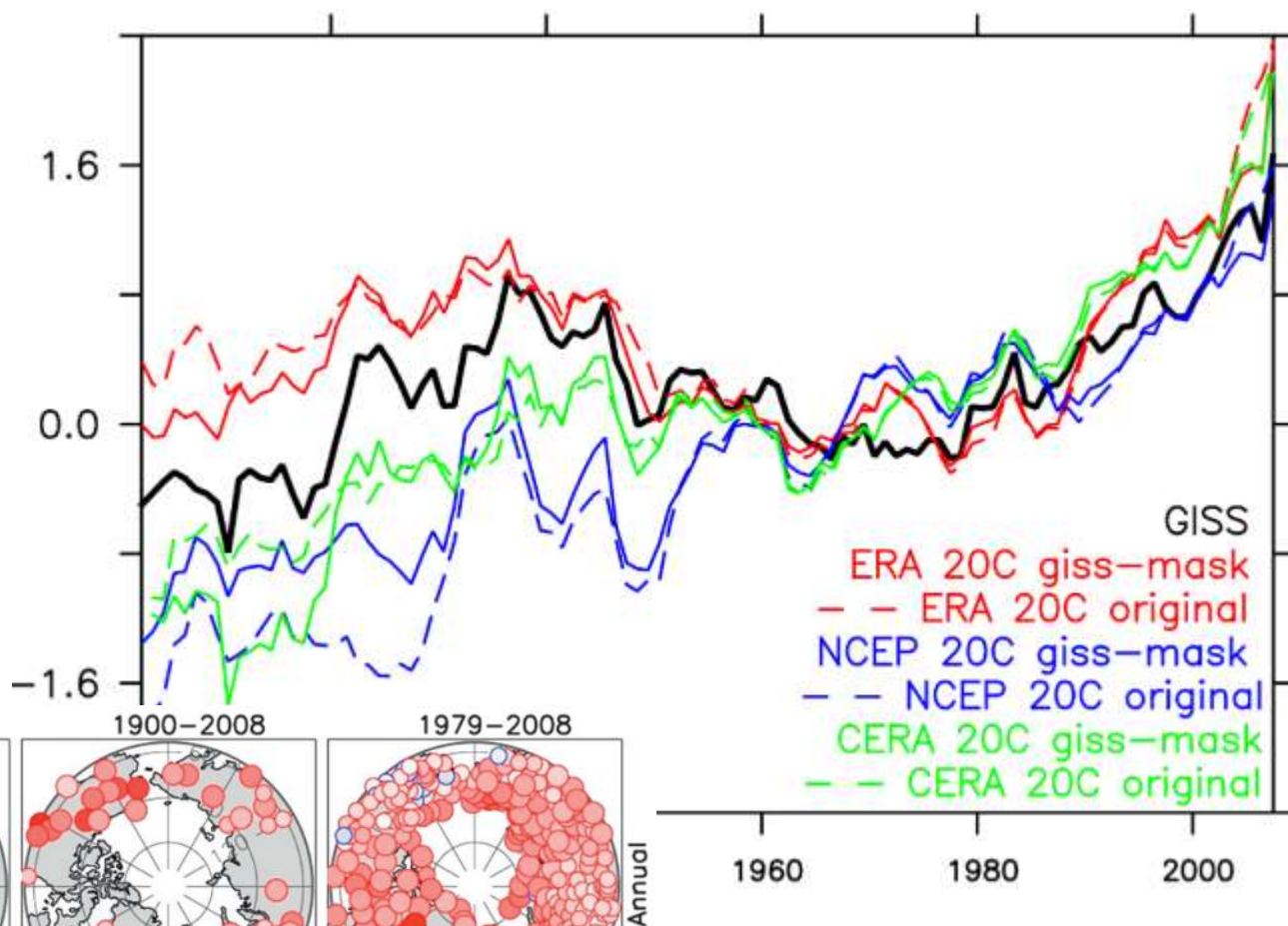
Вертикальная структура изменений температуры атмосферы

Тренд среднегодовой температуры в 1978-2007 (°C), данные NCEP



Semenov et al. 2010, JC

Аномалии среднегодовой температуры в Арктике по данным GISS и различных реанализов для 20 века, °C



Бокучава, Семенов, 2017, ФПК

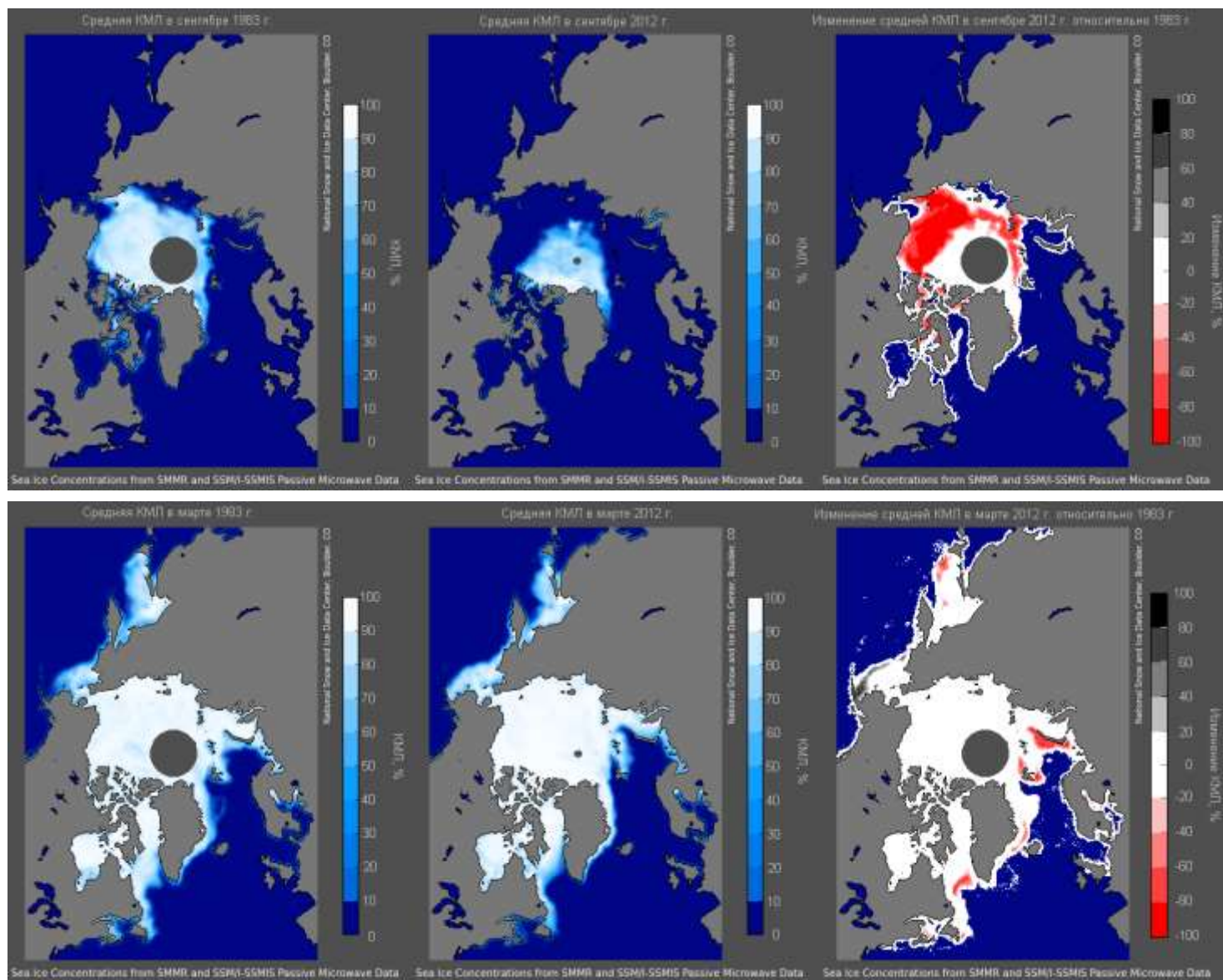
Климатические тренды приземной температуры в Арктике в 2-3 раза больше, чем для глобальной температуры – арктическое усиление.

Причина арктического усиления – в особенностях отклика ЗКС на внешнее радиационное воздействие, ряде положительных обратных связей в арктической климатической системе, в интенсивной внутренней изменчивости в Арктике.

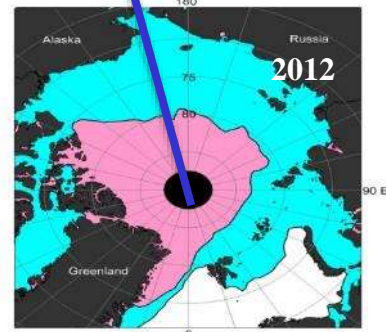
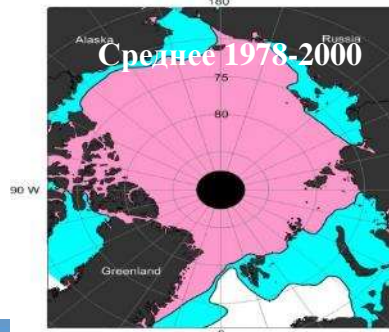
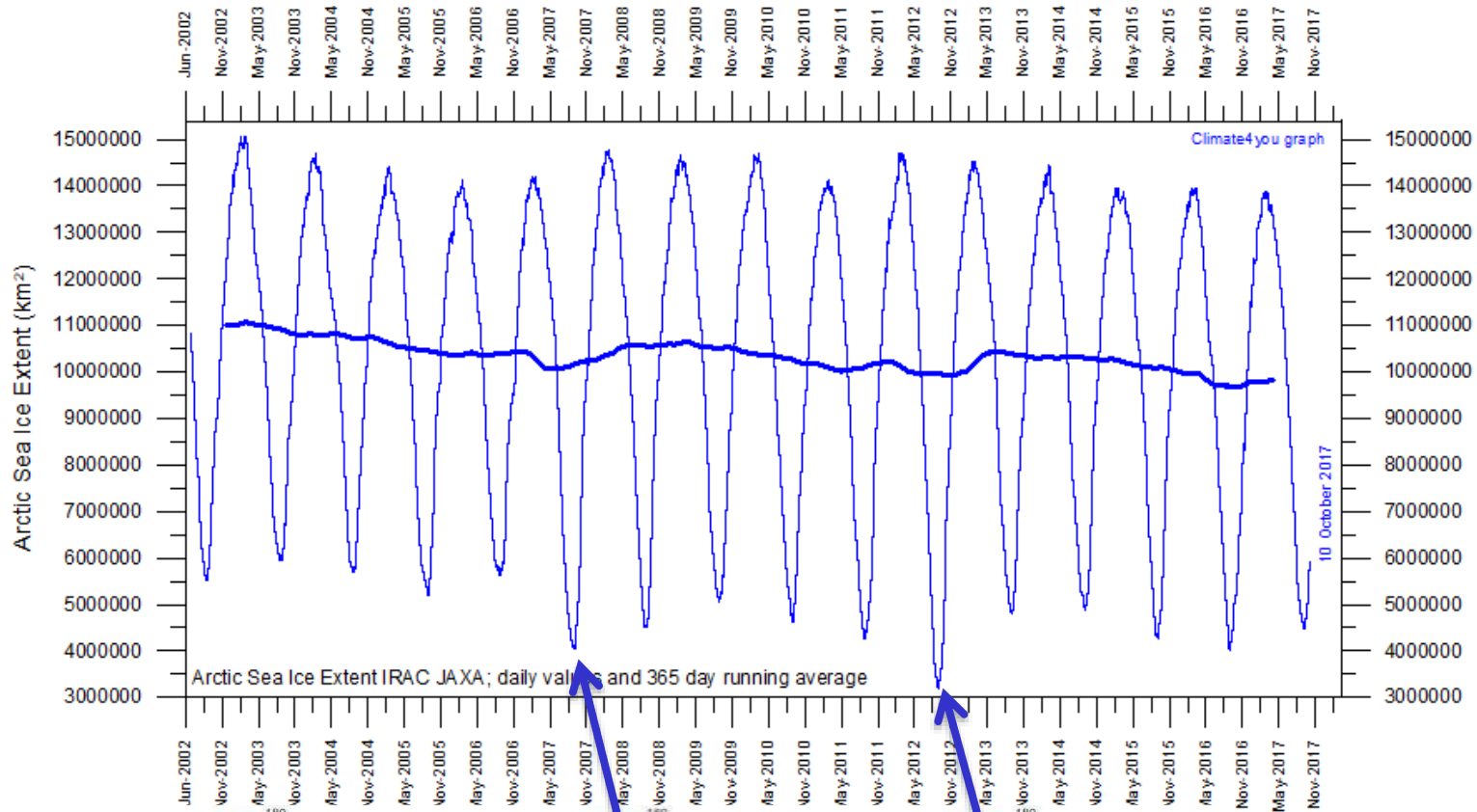
Современное потепление в высоких широтах наиболее сильно проявляется у поверхности и в нижней тропосфере.

Существует значительная неопределенность в оценках эволюции приземной температуры в Арктике в первой половине 20 века.

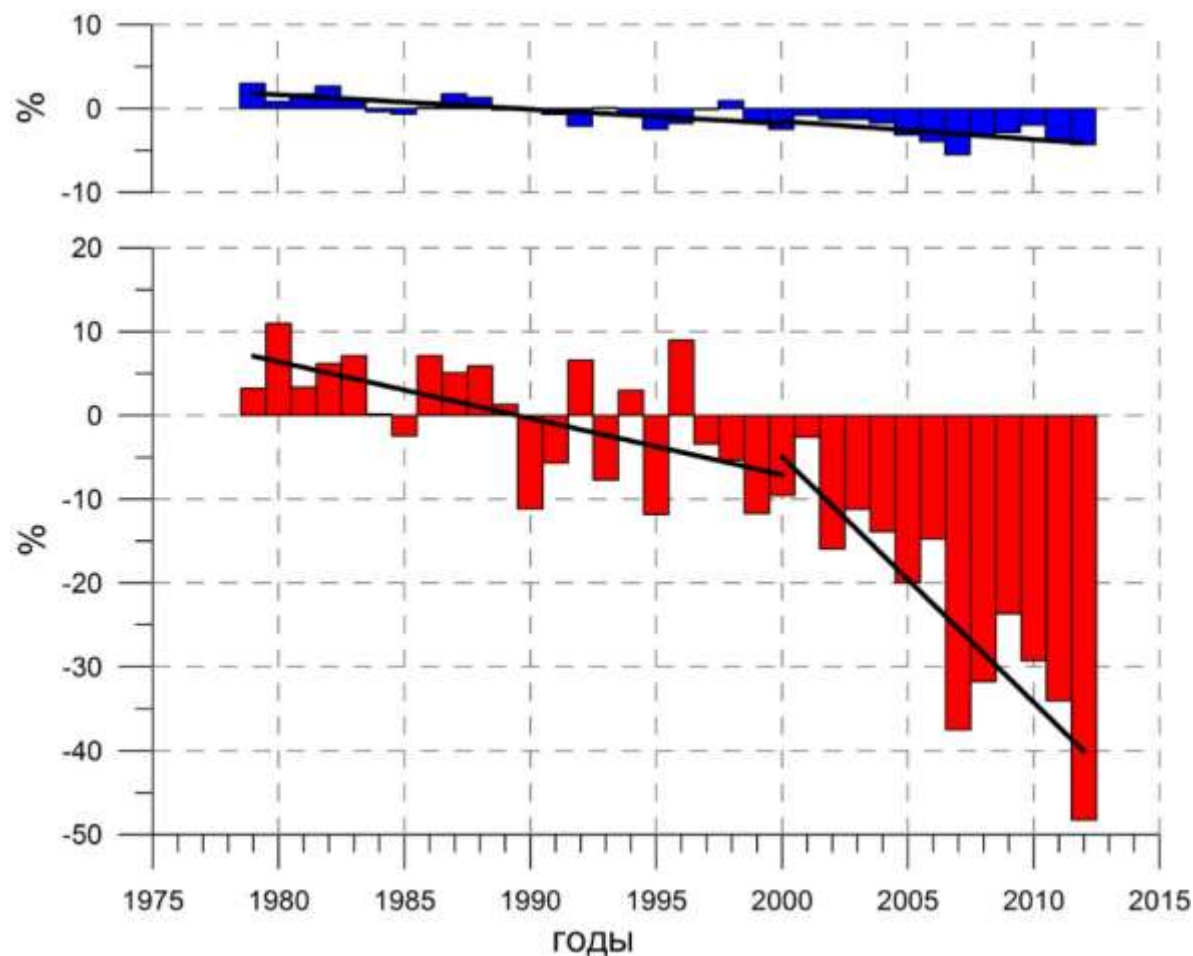
Концентрация морских льдов в 1983 г. и в 2012 г. по спутниковым данным



Площадь морских льдов: минимальные значения в 2007 и 2012 гг.

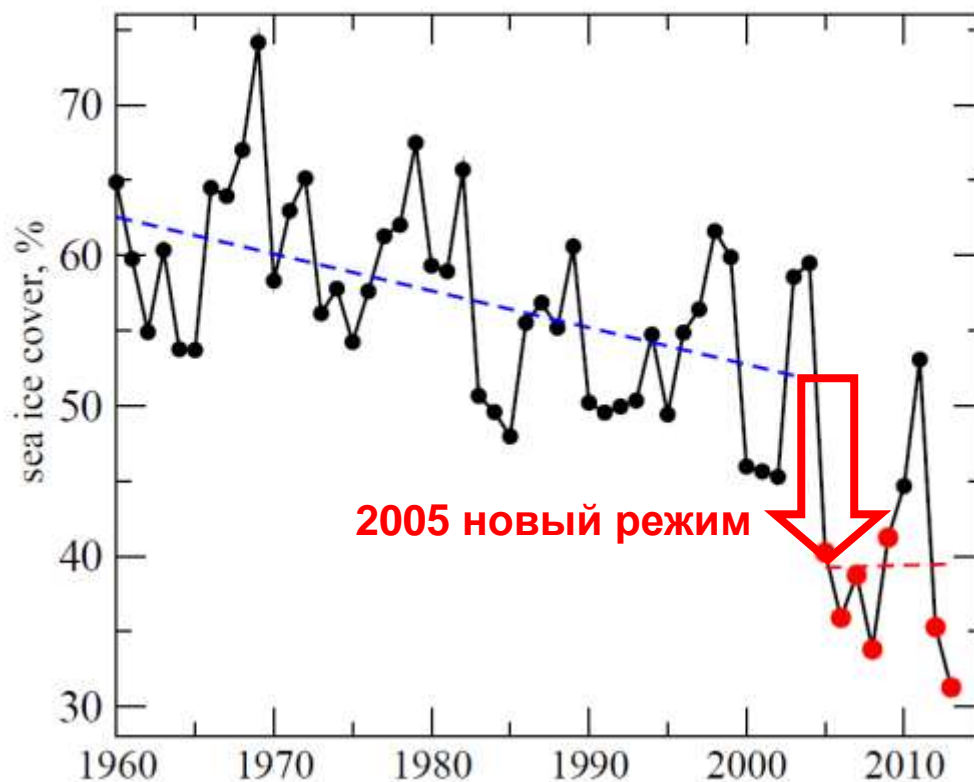


Аномалия распространения льда (%) относительно среднего за период 1979–2000 гг. в **марте** и в **сентябре** по данным спутниковых наблюдений (Иванов и др. 2013)

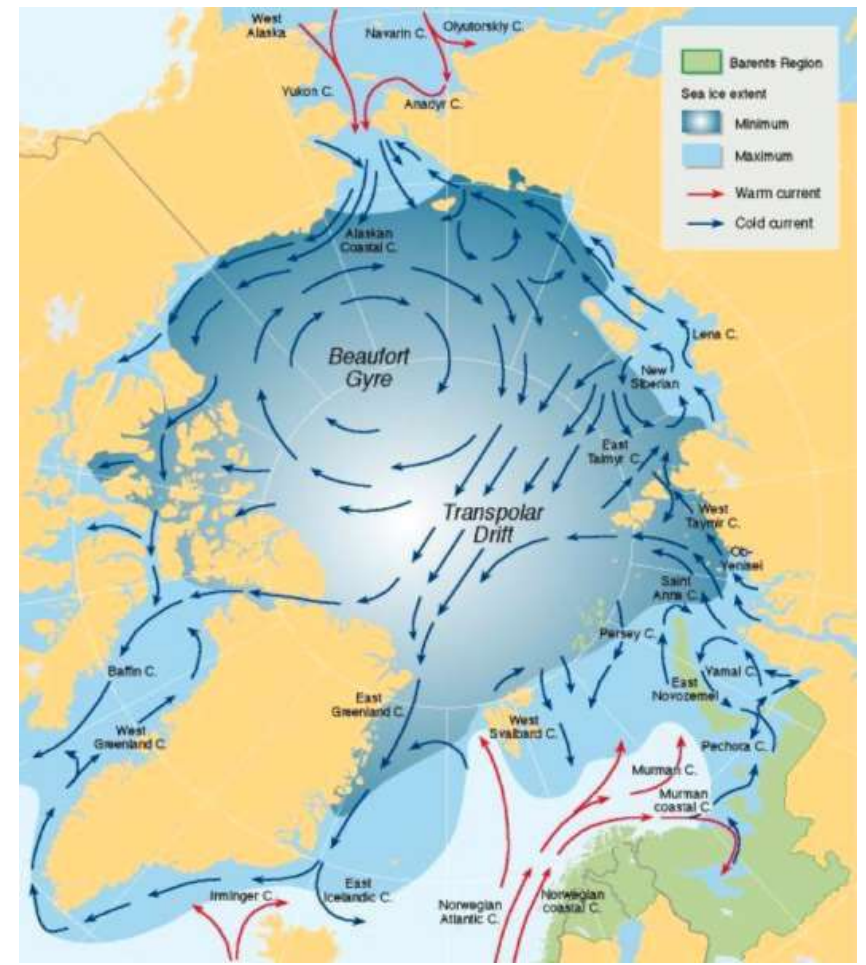
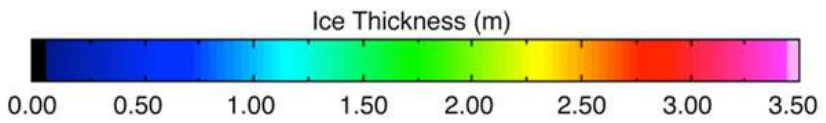
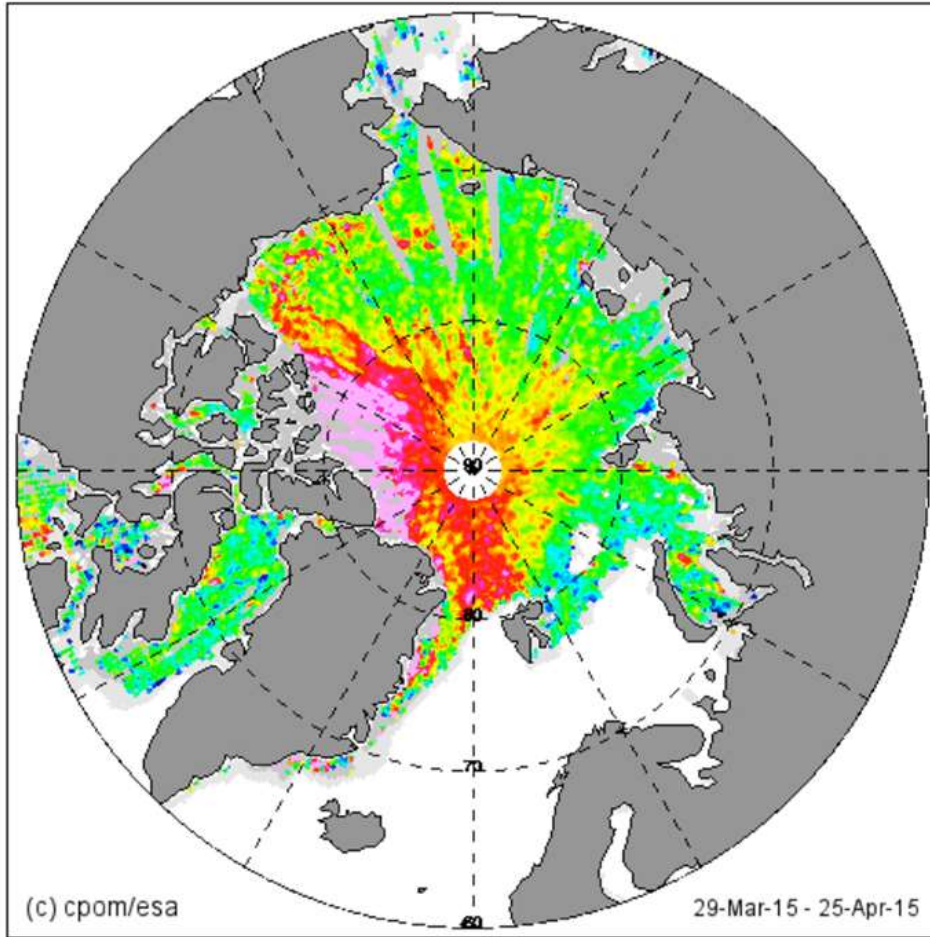


Морской лед в Баренцевом море

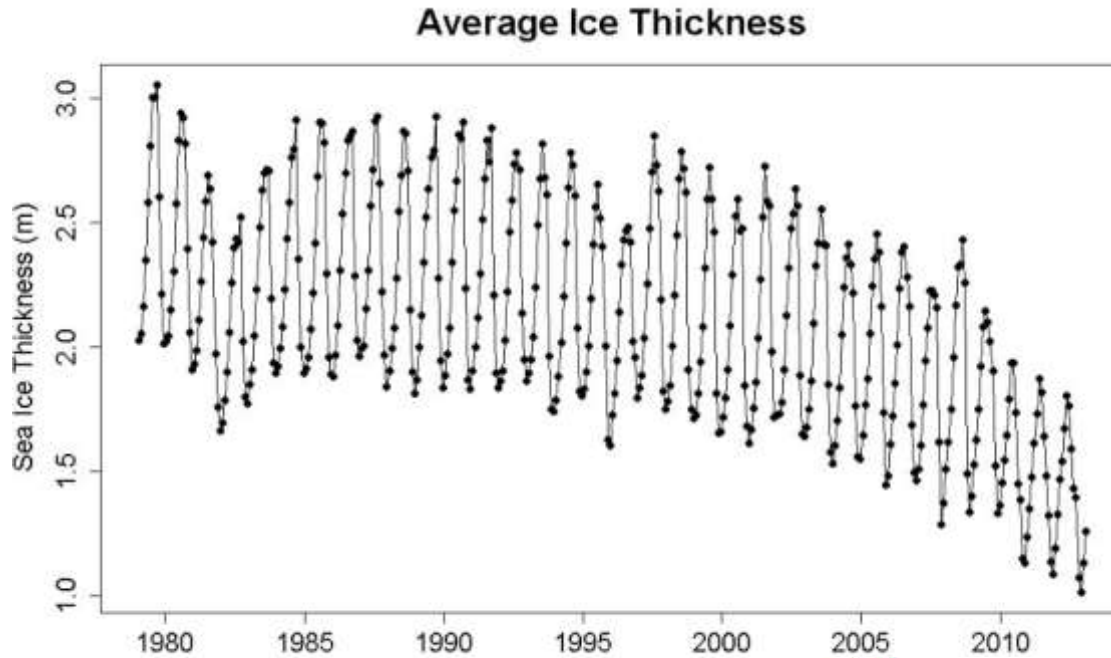
Доля поверхности моря с морскими льдами зимой (%)



Толщина морского льда в Арктике

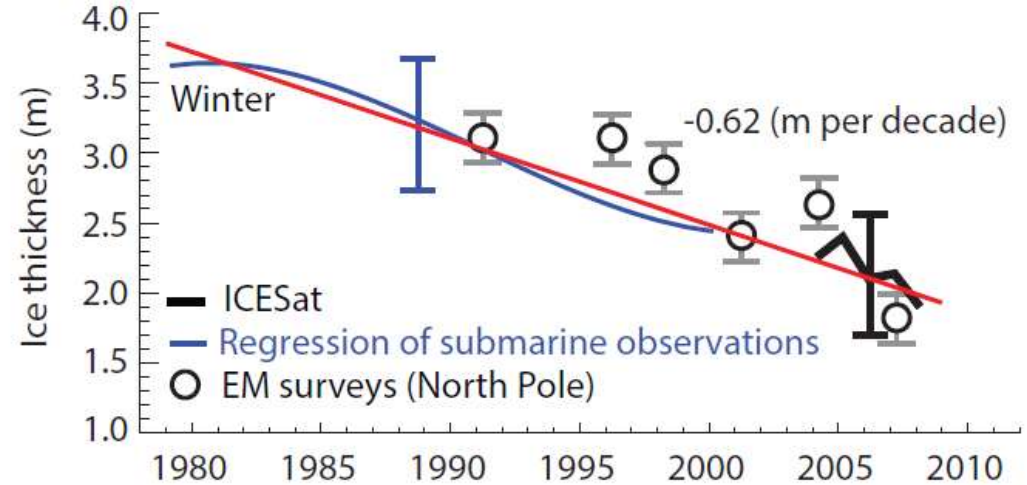


Толщина морского льда в Арктике: тренды



Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System (**PIOMAS**)

IPCC AR5, 2013
Figure 4.6

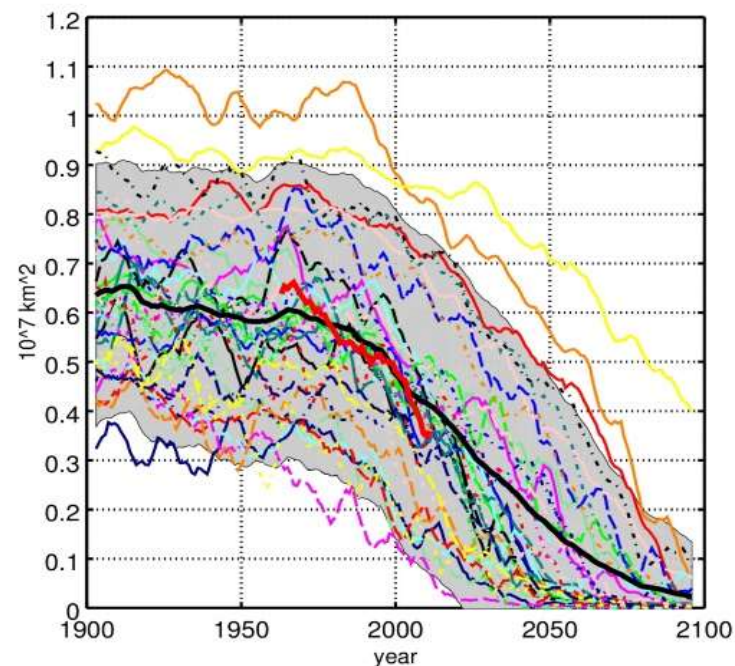
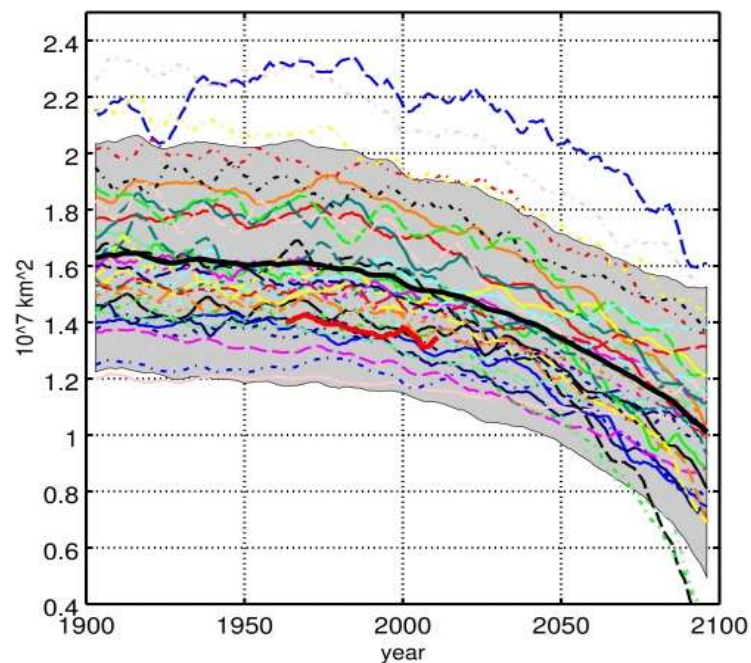


Морской лед в моделях CMIP5: площадь морских льдов S в Арктике

Сценарий RCP8.5

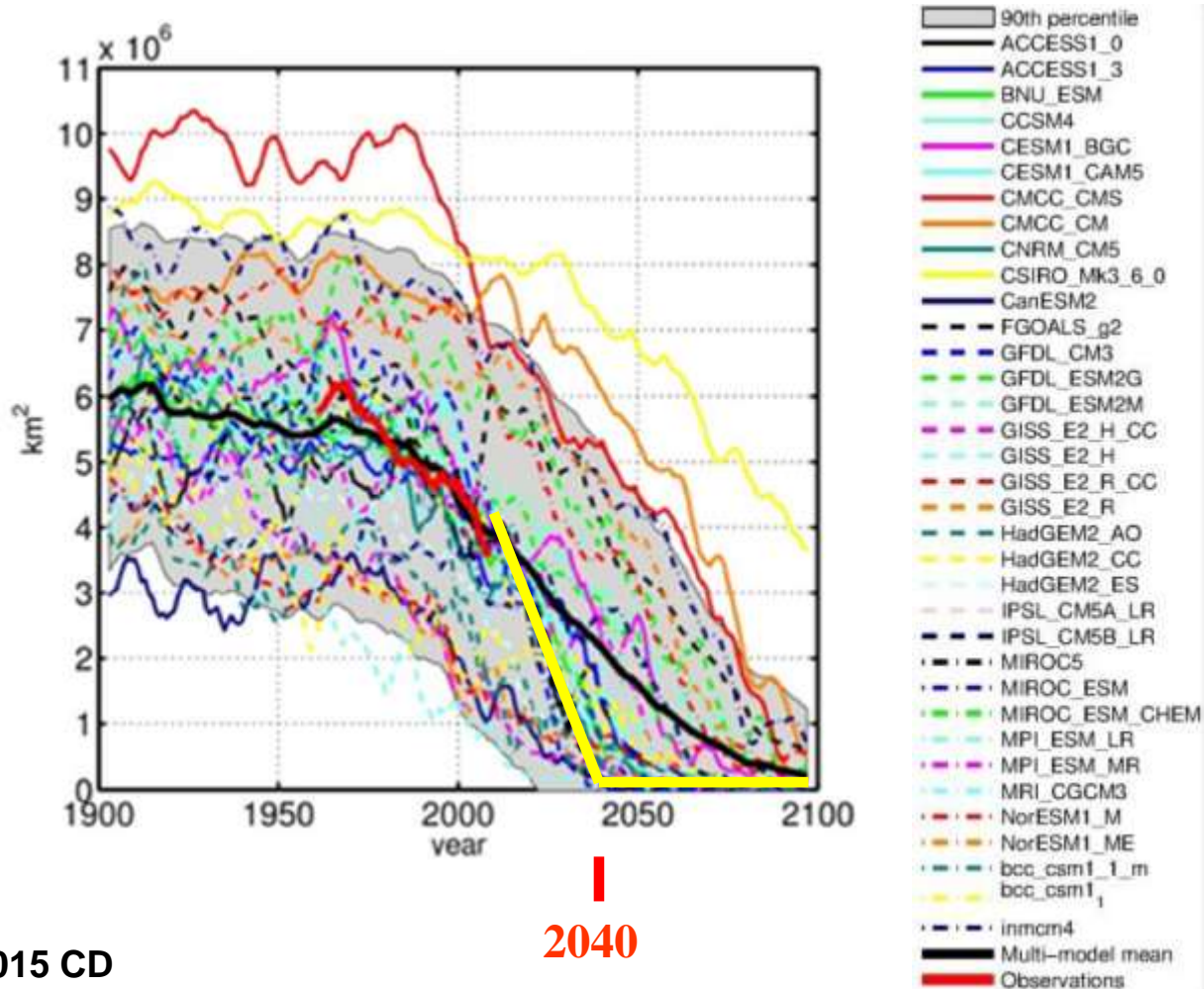
март

сентябрь



Морской лед в моделях CMIP5: площадь морских льдов S в Арктике

September Arctic sea ice area in CMIP5 models (RCP8.5), км²



Semenov et al., 2015 CD

2040

От чего зависят параметры морского льда в климатических моделях?

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L10501, doi:10.1029/2007GL029914, 2007

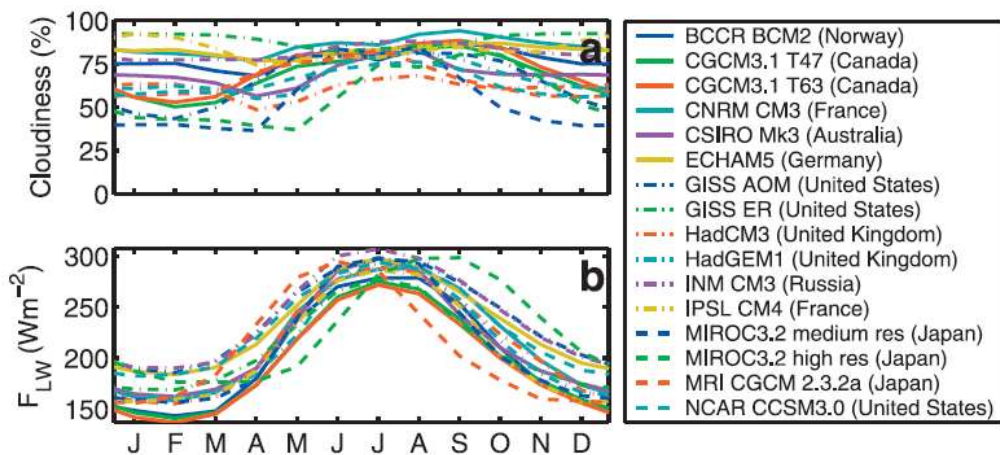


On the reliability of simulated Arctic sea ice in global climate models

I. Eisenman,¹ N. Untersteiner,² and J. S. Wettlaufer³

Received 8 March 2007; accepted 17 April 2007; published 18 May 2007.

Разброс годового хода облачности и приходящей длинноволновой радиации DLWR в моделях CMIP3



Зависимость среднегодовой толщины льда от DLWR и альbedo

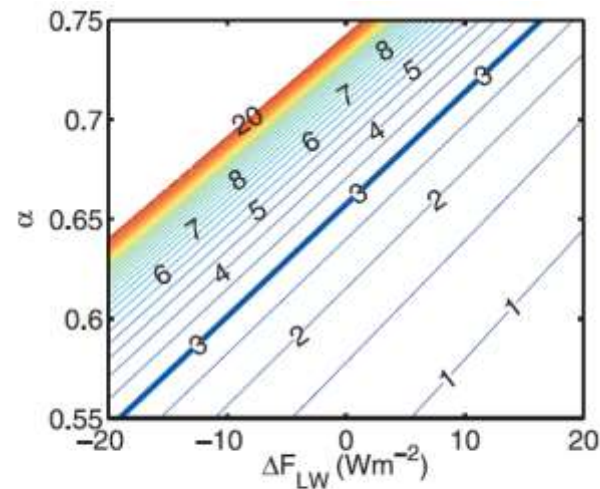
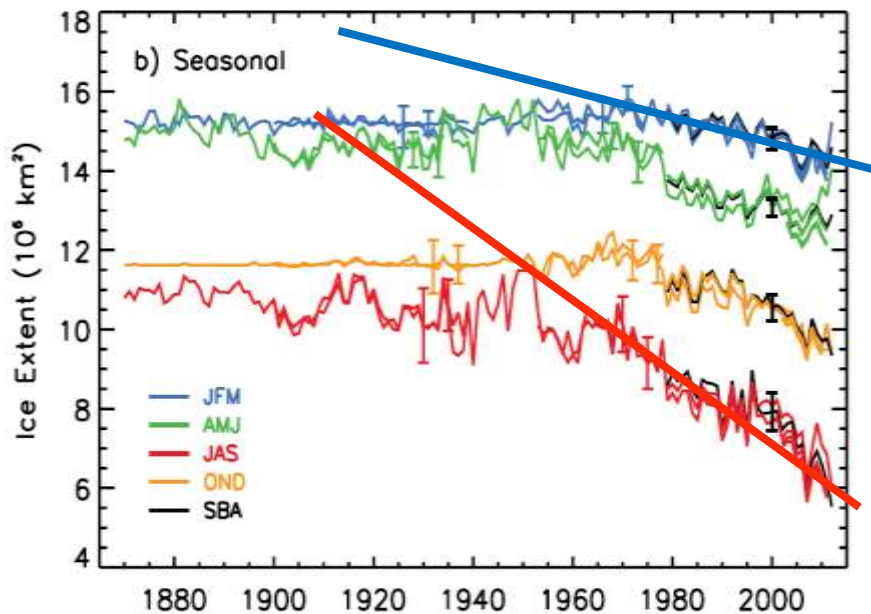


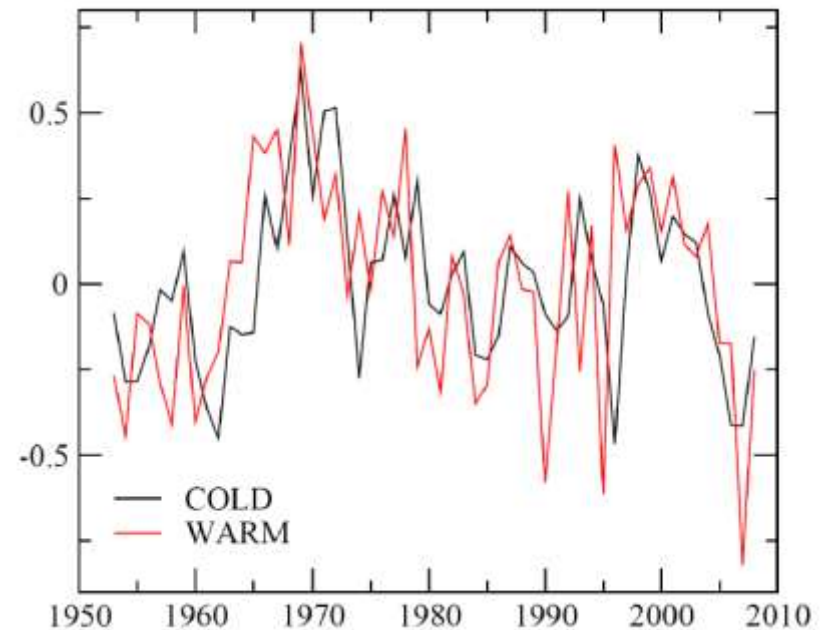
Figure 3. Equilibrium ice thickness in the idealized analytical model (equation 3) as a function of absorbed radiation for the range of downwelling longwave radiative fluxes predicted by GCMs (ΔF_{LW}) and varying ice albedo (α).

Сезонность изменений ПМЛ на различных временных масштабах

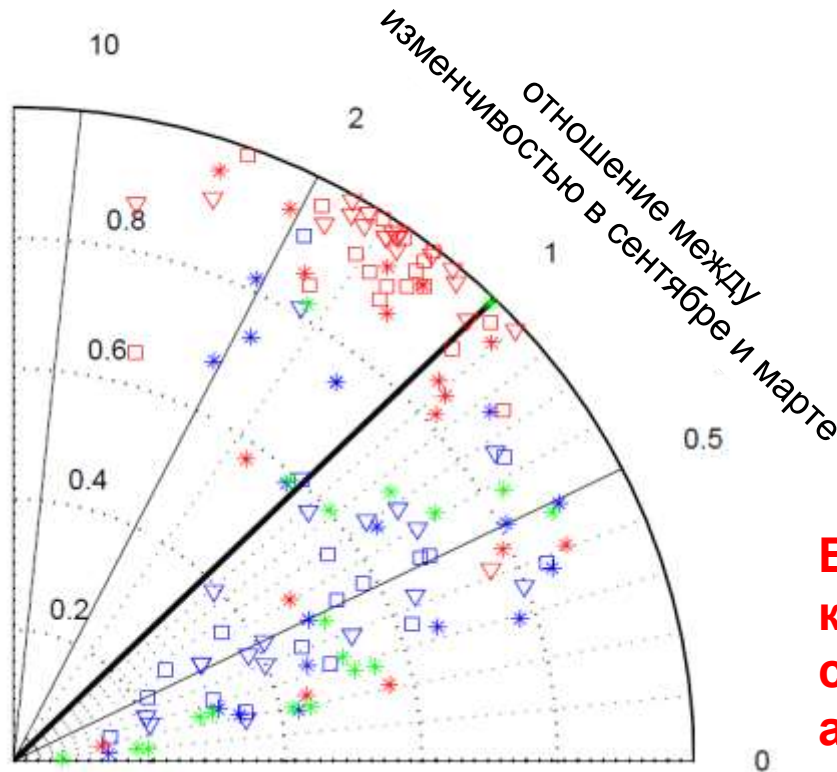
Изменения ПМЛ в различные сезоны
(по данным наблюдений)



Изменения ПМЛ в холодное и теплое полугодия
(млн.км²) после удаления климатического тренда
(по данным наблюдений)



Сезонность изменений ПМЛ на различных временных масштабах



Естественные колебания климата приводят к более сильным изменениям зимой, а антропогенные - летом

корреляция между изменениями в сентябре и марте

- | | |
|---|-------------------------|
| красные значки – антропогенные изменения | * Anth. 1950–2000 |
| | * Anth. о. Т. 1950–2000 |
| | □ Anth 1950–2050 |
| | □ Anth. о. Т. 1950–2050 |
| синие и зеленые значки – естественные колебания | ▽ Anth 1950–2100 |
| | ▽ Anth. о. Т. 1950–2100 |
| | * Kontrolllauf |

Исторические изменения площади морских льдов в Арктике

IPCC 2013:

Arctic sea ice extent changes

Что происходило с площадью морских льдов в Арктике в первой половине XX века?

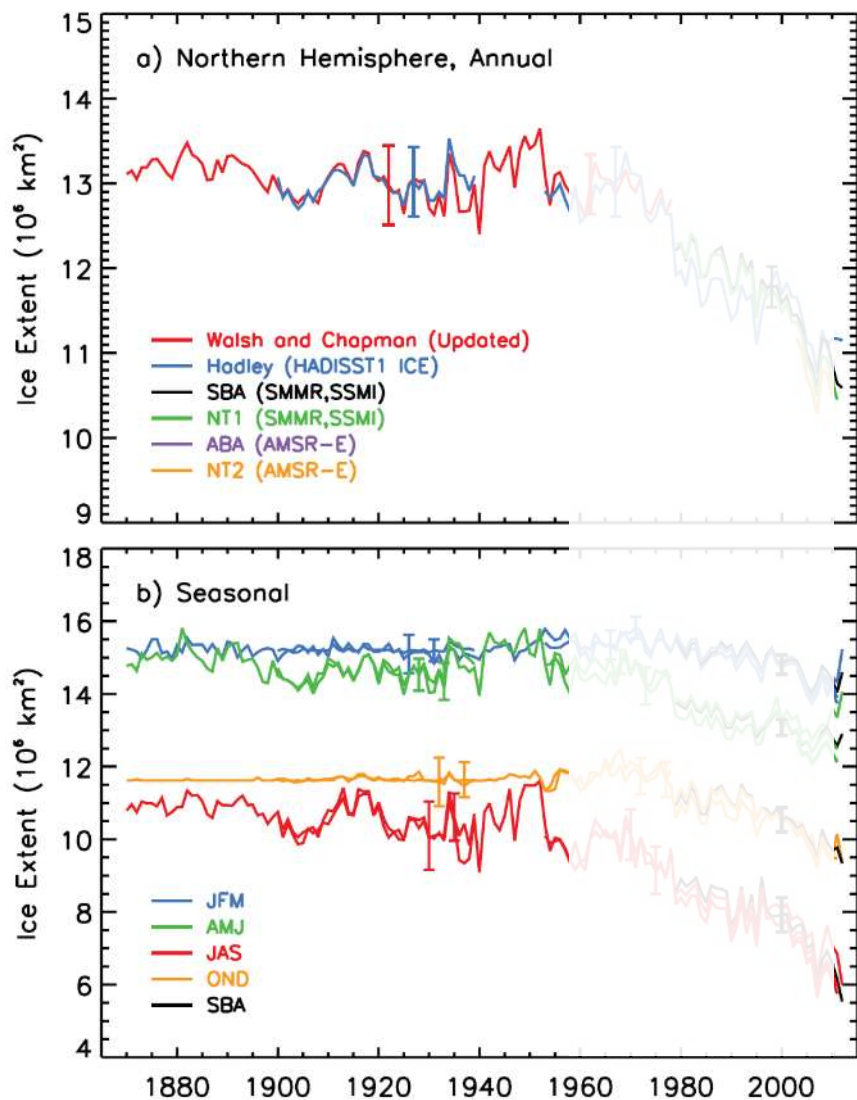
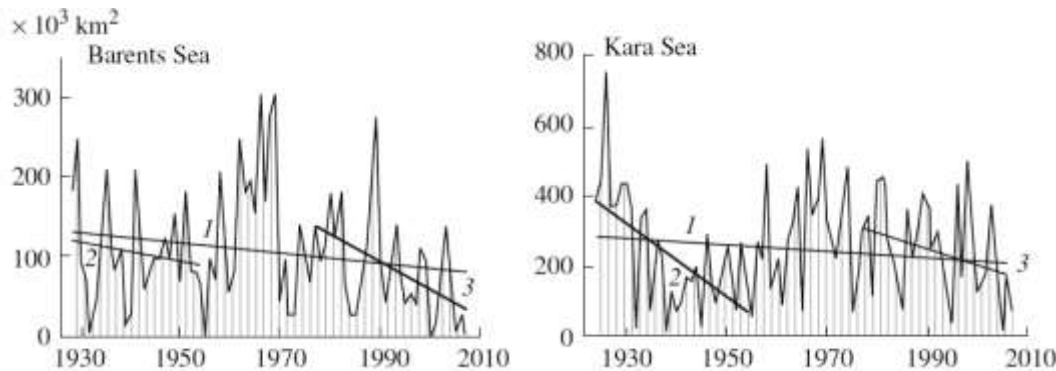


Figure 4.3 | Ice extent in the Arctic from 1870 to 2011. (a) Annual ice extent and (b) seasonal ice extent using averages of mid-month values derived from *in situ* and other sources including observations from the Danish meteorological stations from 1870 to 1978 (updated from, Walsh and Chapman, 2001). Ice extent from a joint Hadley and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) project (called HADISST1_Ice) from 1900 to 2011 is also shown. The yearly and seasonal averages for the period from 1979 to 2011 are shown as derived from Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) and Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) passive microwave data using the Bootstrap Algorithm (SBA) and National Aeronautics and Space Administration (NASA) Team Algorithm, Version 1 (NT1), using procedures described in Comiso and Nishio (2008), and Cavalieri et al. (1984), respectively; and from Advanced Microwave Scanning Radiometer, Version 2 (AMSR2) using algorithms called AMSR Bootstrap Algorithm (ABA) and NASA Team Algorithm, Version 2 (NT2), described in Comiso and Nishio (2008) and Markus and Cavalieri (2000). In (b), data from the different seasons are shown in different colours to illustrate variation between seasons, with SBA data from the procedure in Comiso and Nishio (2008) shown in black.

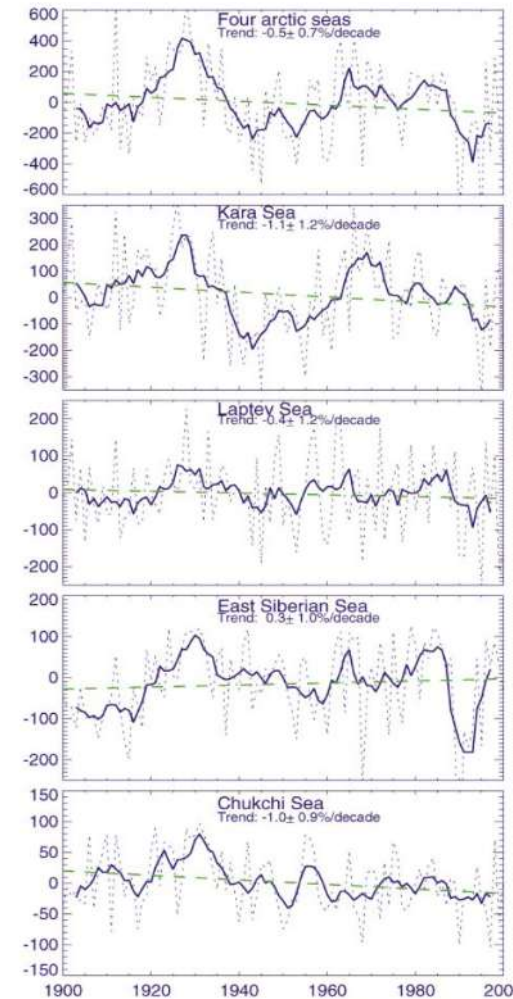
Арктический лед во время потепления середины 20 века

Региональные данные по распространению морских льдов в Арктике

Alekseev et al. 2009



Polyakov et al. 2003



Fauria et al. 2010

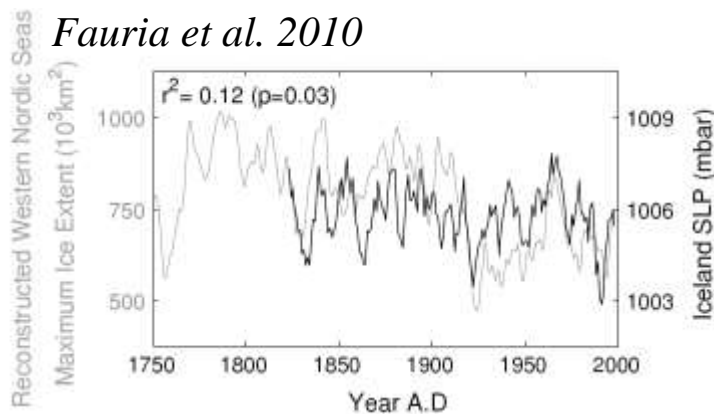


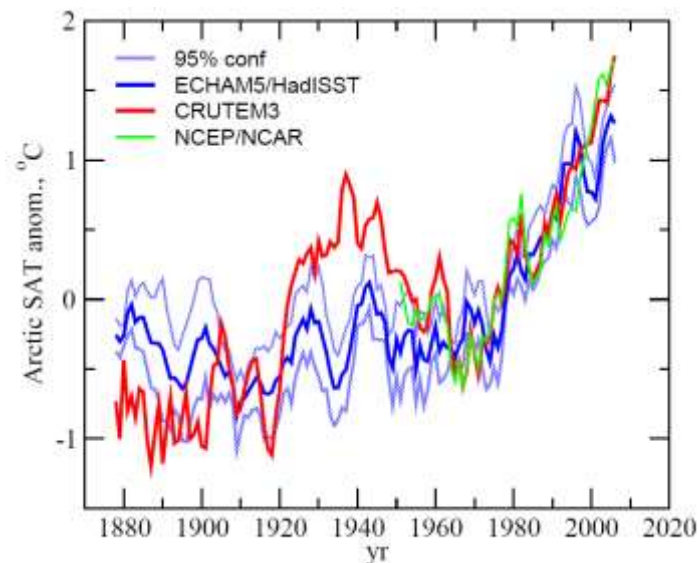
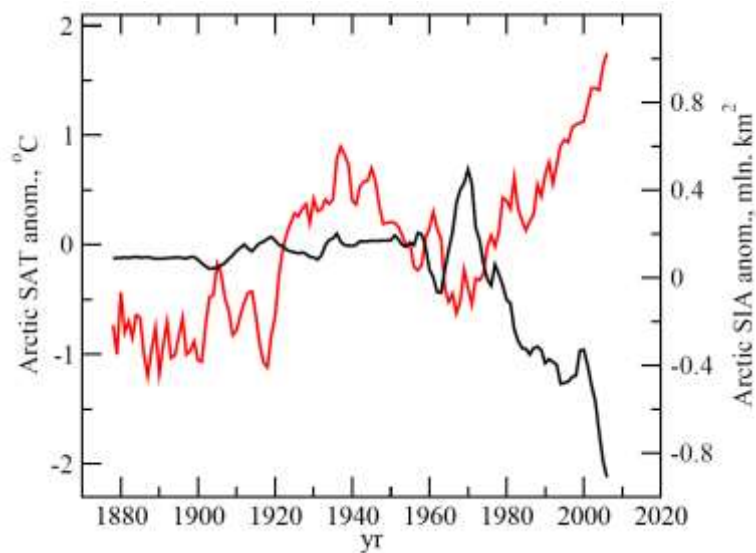
Fig. 7 Reconstructed maximum sea ice extent in the Western Nordic Seas (*grey line*) versus annual Iceland sea level pressure record since 1820 (*black line*; Jones et al. 1999). Significance level was calculated taking into account autocorrelation in the timeseries (see “Data and methods”)

Арктический лед во время потепления середины 20 века

Морской лед и температура: модель атмосферы как инструмент диагностики

Существует явное противоречие между изменениями т-ры и площади морских льдов в период потепления середины XX века по данным HadISST1

Эксперименты с МОЦА с использованием данных HadISST1 позволяют оценить связь т-ры с площадью морских льдов и оценить ее аномалию в середине XX века

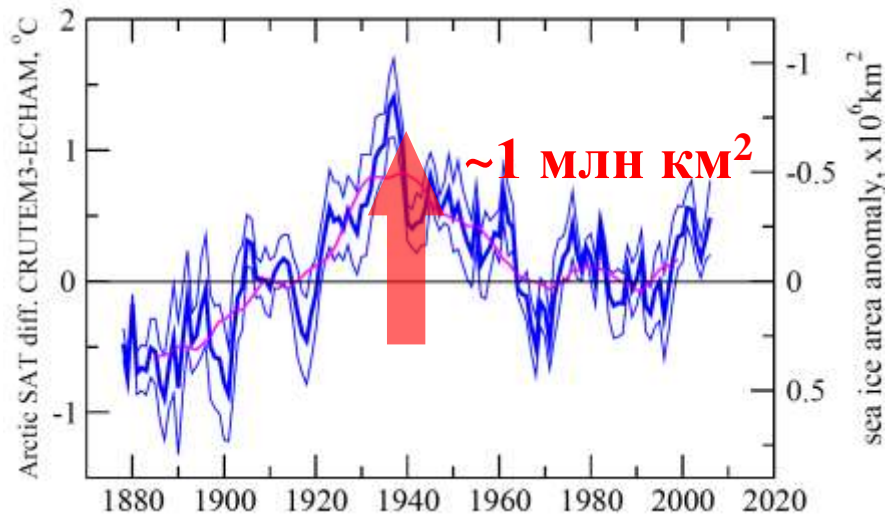


Semenov and Latif, 2012

Арктический лед во время потепления середины 20 века

Морской лед и температура: модель атмосферы как инструмент диагностики

Реконструкция изменений площади морских льдов зимой с использованием модели атмосферы и наблюдаемых температурных изменений



Семенов 2014, ФАО

Модельные изменения зимней т-ры в Арктике с изменением 1) ТПО и льда, 2) только льда, 3) только ТПО

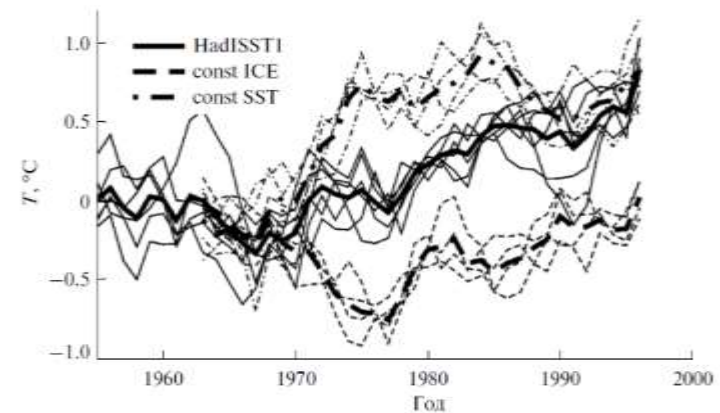


Рис. 4. Аномалии приповерхностной температуры воздуха $T(^{\circ}\text{C})$ в холодный период года (ноябрь–апрель) над сушей в арктическом регионе ($60\text{--}90^{\circ}\text{N}$) по данным экспериментов с моделью ECHAM5 с использованием данных HadISST1.1 (сплошные линии), с неизменяющимися среднемесячными данными по ТПО с 1966 г. (с этого года до 1998 г. использовались среднемесячные данные по ТПО для 1966 г., штрихпунктирные линии) и с неизменяющимися среднемесячными данными по концентрации льда с 1966 г. (с этого года до 1998 г. использовались среднемесячные данные по концентрации льда для 1966 г., штриховые линии). Жирные линии – средние по ансамблю экспериментов. Тонкие линии – данные соответствующих индивидуальных экспериментов. Все данные сглажены 5-летним скользящим средним.

Разница приповерхностной температуры над сушей по данным наблюдений и результатам модельных экспериментов с использованием данных HadISST1 как граничных условий и оценка аномалии площади морских льдов в зимний период (ноя-апр)

Площадь распространения морских льдов в Арктике – наиболее точно измеряемый индикатор изменений климата.

Площадь морских льдов в сентябре сокращается на 10% в десятилетие в последние 40 лет. Примерно с такой же скоростью уменьшается средняя толщина морских льдов.

Причины рекордных минимумов ПМЛ в последнее десятилетие – аномалии атмосферной и океанической циркуляции.

Модели характеризуются значительными ошибками в воспроизведении современных характеристик морских льдов в Арктике.

Не ясна роль долгопериодной естественной изменчивости климата в современных климатических трендах. Отсутствует четкая картина изменений ПМЛ в первой половине XX века.

Потепление середины XX века сопровождалось отрицательной аномалией площади морских льдов сравнимой с современным сокращением.

Концепция климатических обратных связей: парниковый эффект

Temperature response ΔT to the forcing ΔQ

$\Delta T_0 = G_0 \Delta Q$ no feedback (FB), G_0 – response function without FB

$\Delta T = G_0(\Delta Q + F\Delta T)$ there is a FB, F – FB function

$\Delta T = \frac{\Delta T_0}{1-f}$, $f = F G_0$ FB coefficient $f = \sum f_i$

Under CO₂ doubling

$\Delta T_0 \approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T \approx 3 \text{ }^\circ\text{C}$

Major climate feedbacks (f_i)

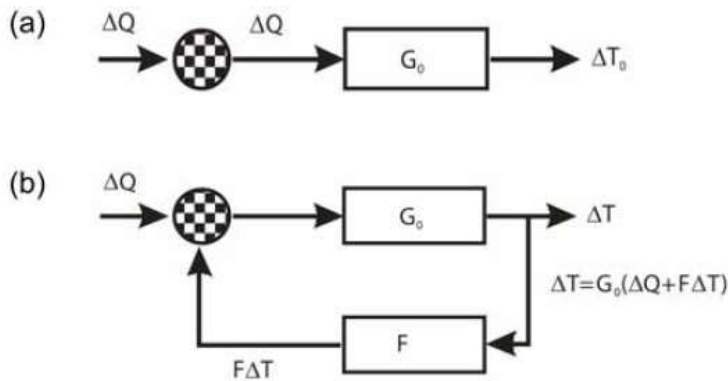
Water vapor 0.4

Cloudiness 0.2

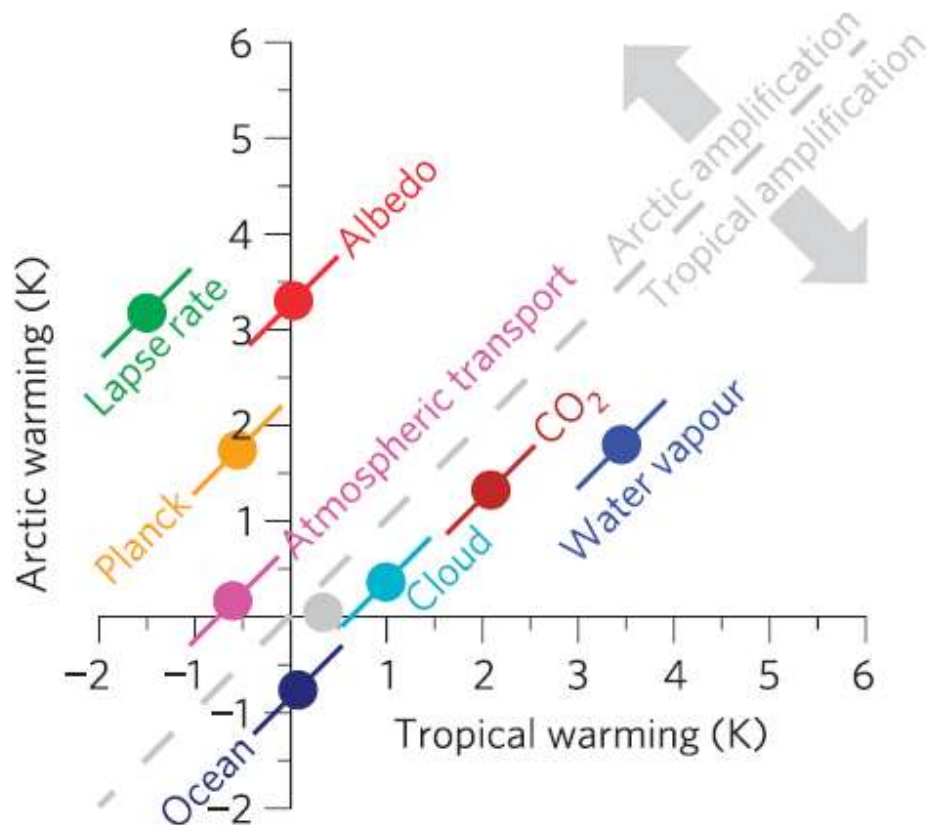
Albedo (snow/ice) 0.1



$f = \sum f_i = 0.7$



Какие обратные связи действуют в Арктике?



Albedo

Lapse rate

Planck

Water vapour

CO₂

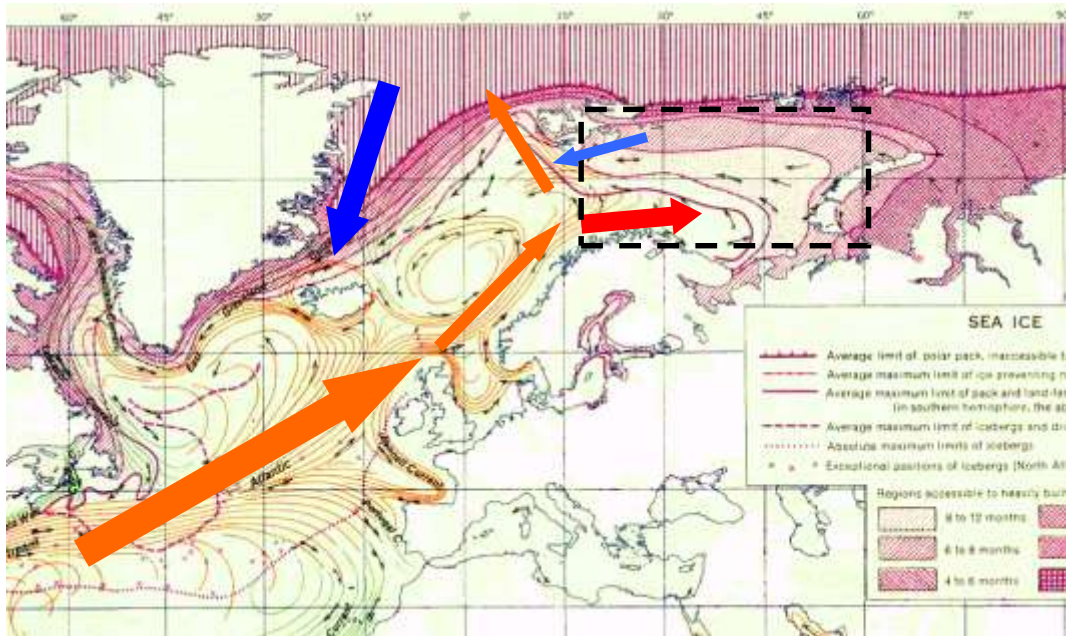
Atmospheric transport

Ocean transport

Cloud

Pithan and Mauritsen 2014, Nature Geoscience

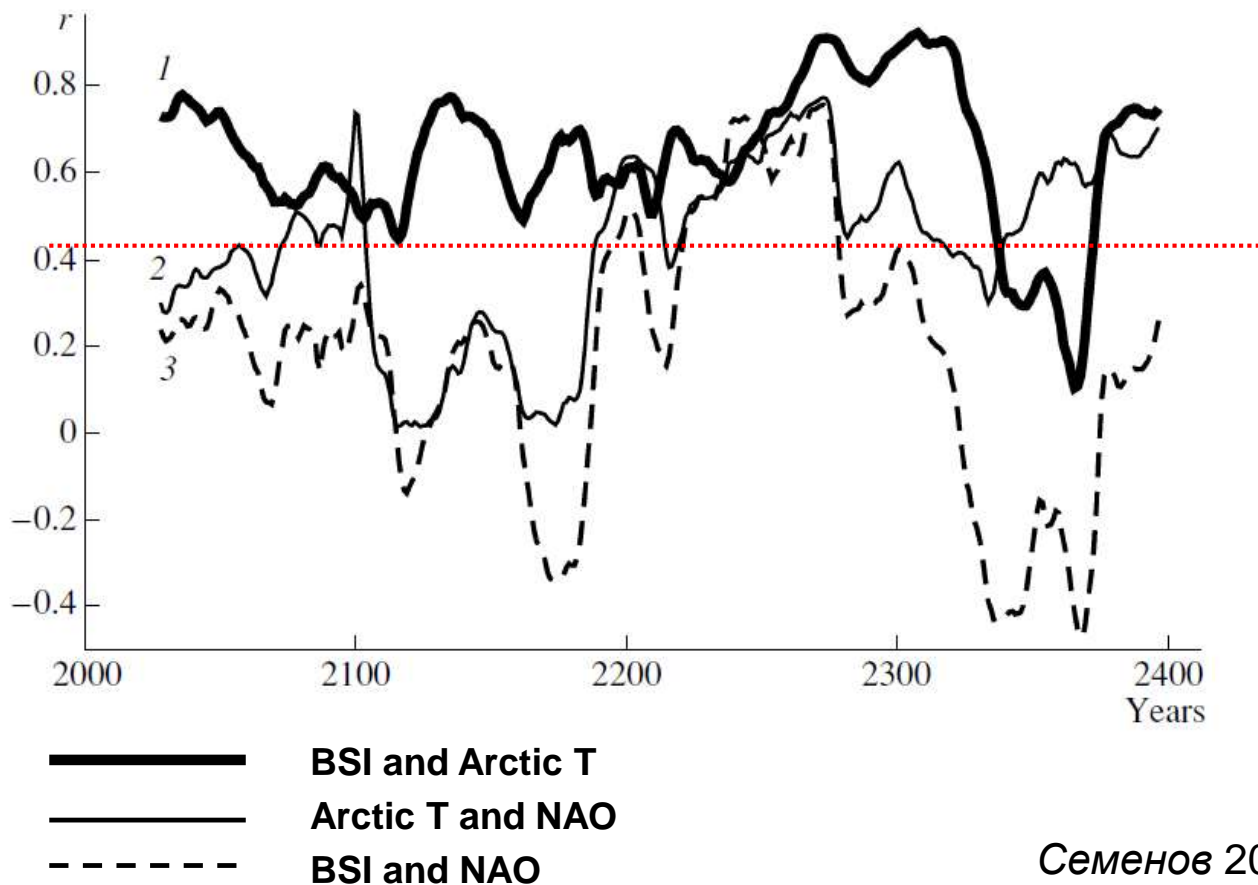
Океанический приток в Баренцево море: главный фактор формирования долгопериодной климатической изменчивости в Арктике



BSI transports ~ 2 Sv warm and saline Atlantic water, appr. half of the AW going to the Arctic Ocean

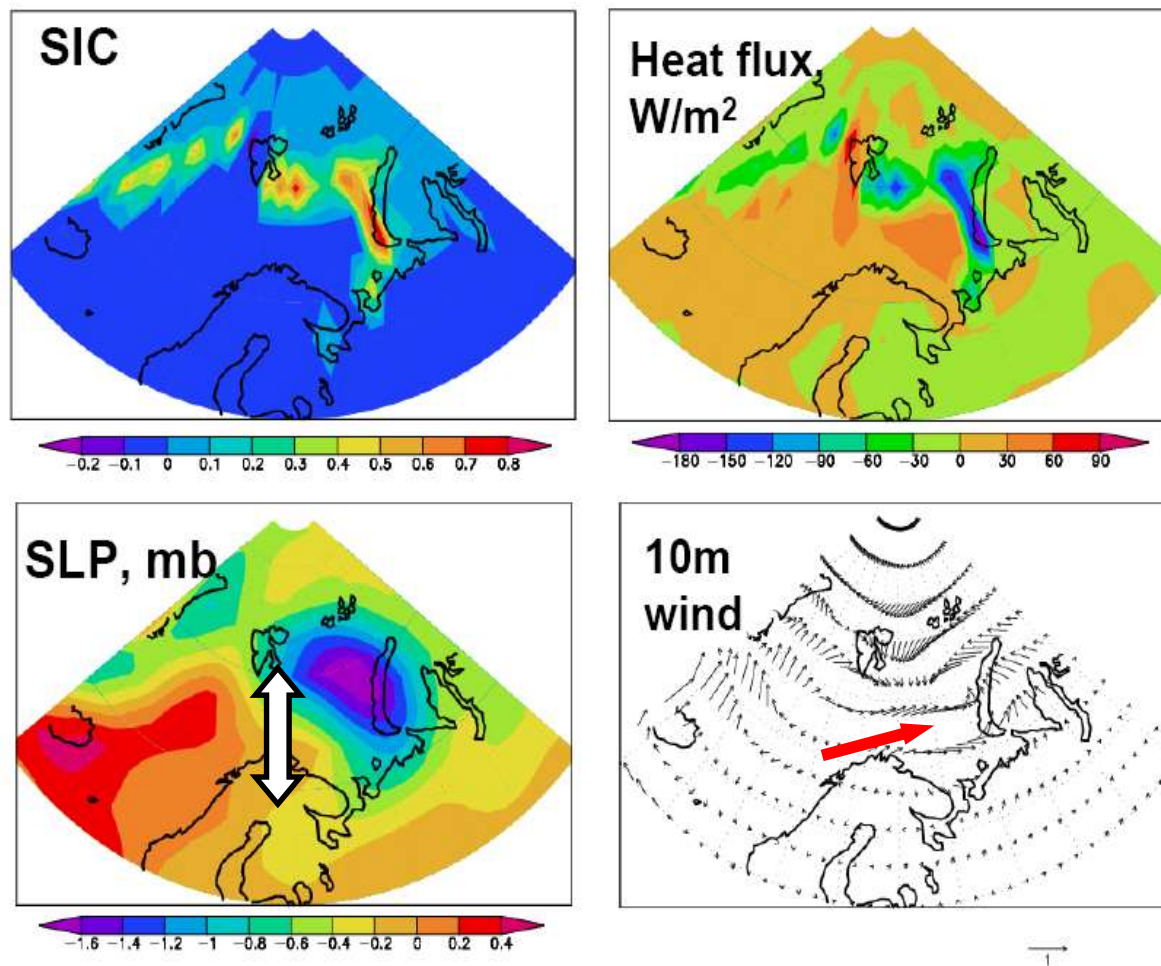
Океанический приток в Баренцево море: главный фактор формирования долгопериодной климатической изменчивости в Арктике

Moving window correlations between BSI and Arctic temperature and NAO in ECHAM5-MPI-OM model



Семенов 2008, ДАН

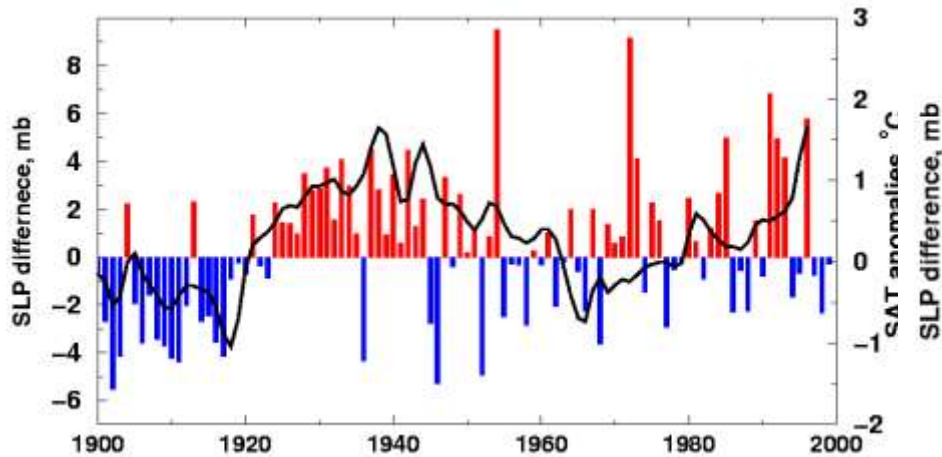
Отклик атмосферной циркуляции на уменьшение площади морских льдов в Арктике



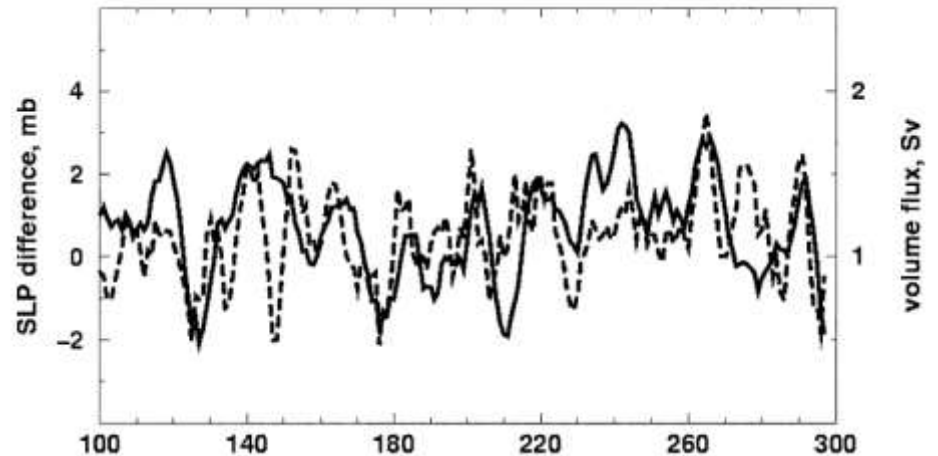
Bengtsson, Semenov, Johannessen 2004, Journal of Climate

Океанический приток в Баренцево море, усиленный положительной обратной связью мог быть причиной интенсивного потепления в середине XX века в Арктике

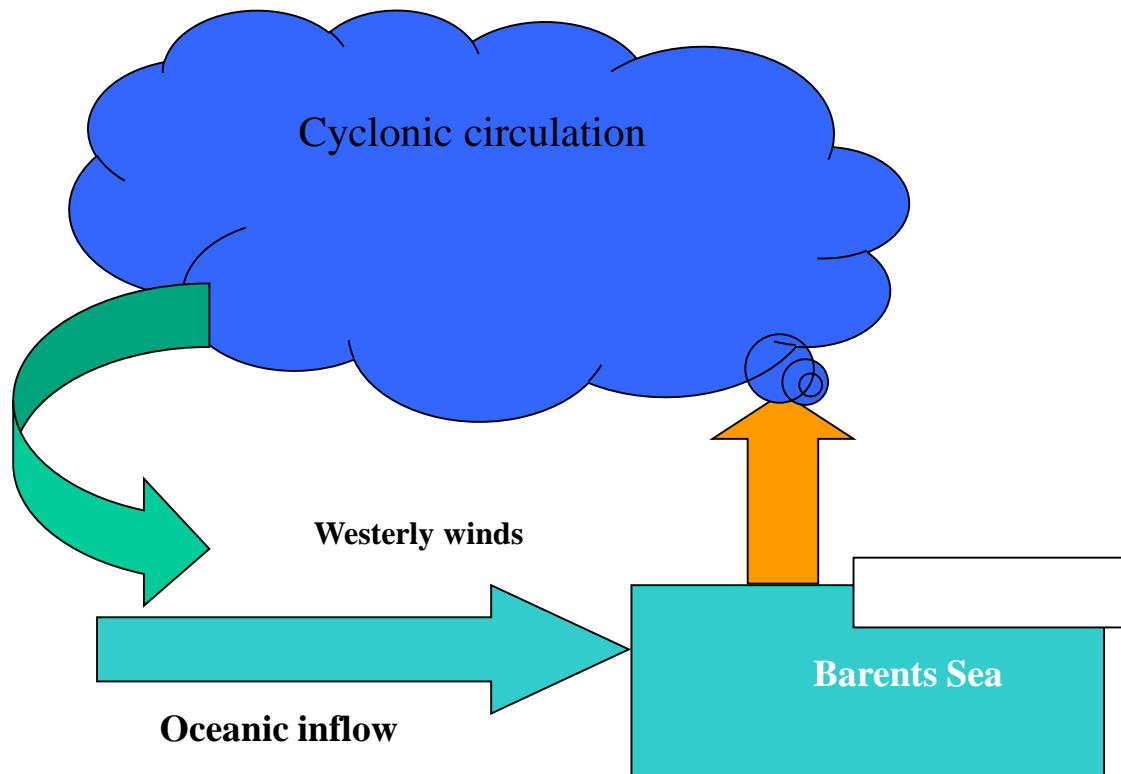
SLP difference (index of BSI) and Arctic temperature



SLP difference and BSI in MPI climate model



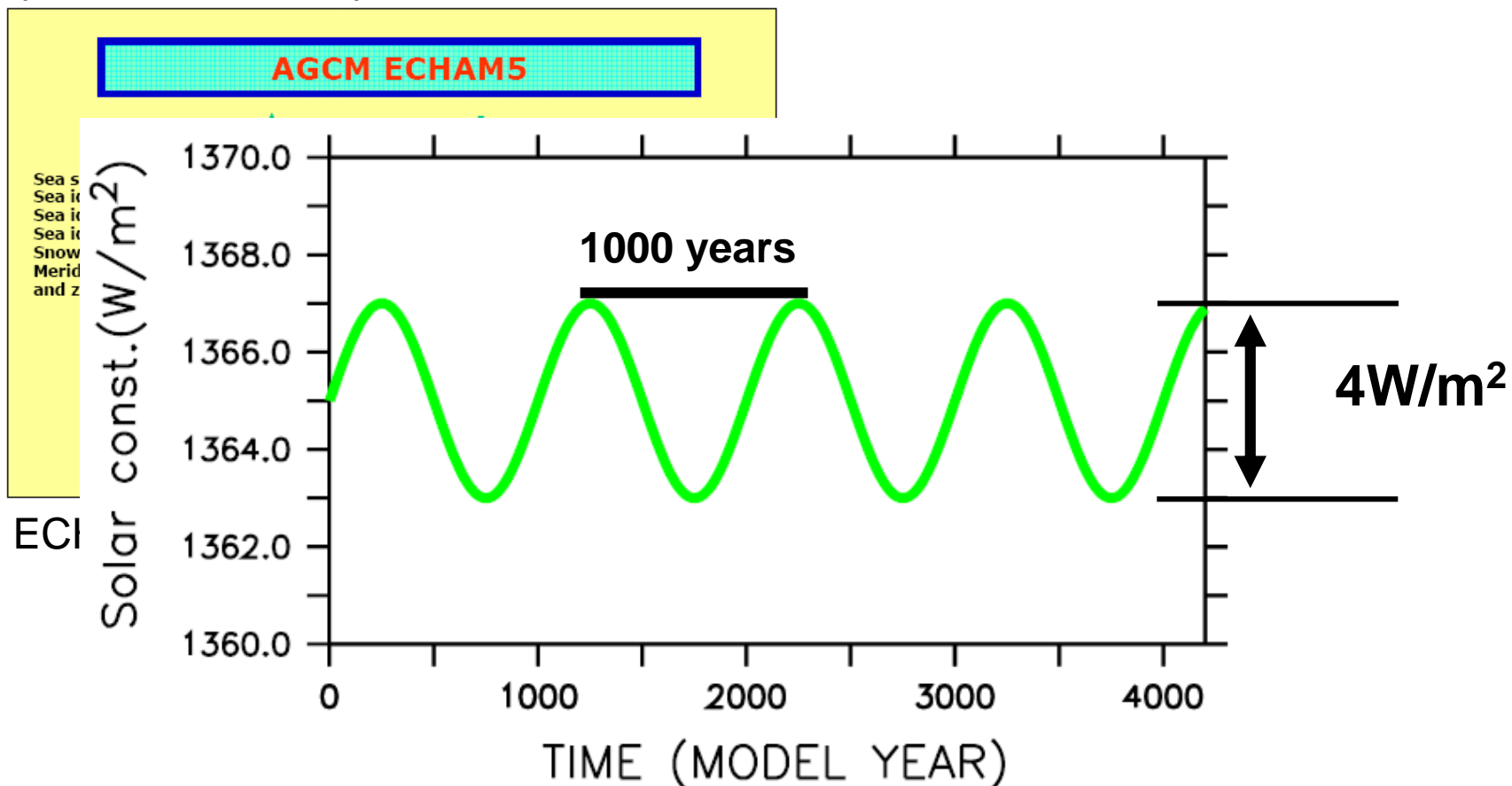
Положительная обратная связь между притоком в БМ и морским льдом



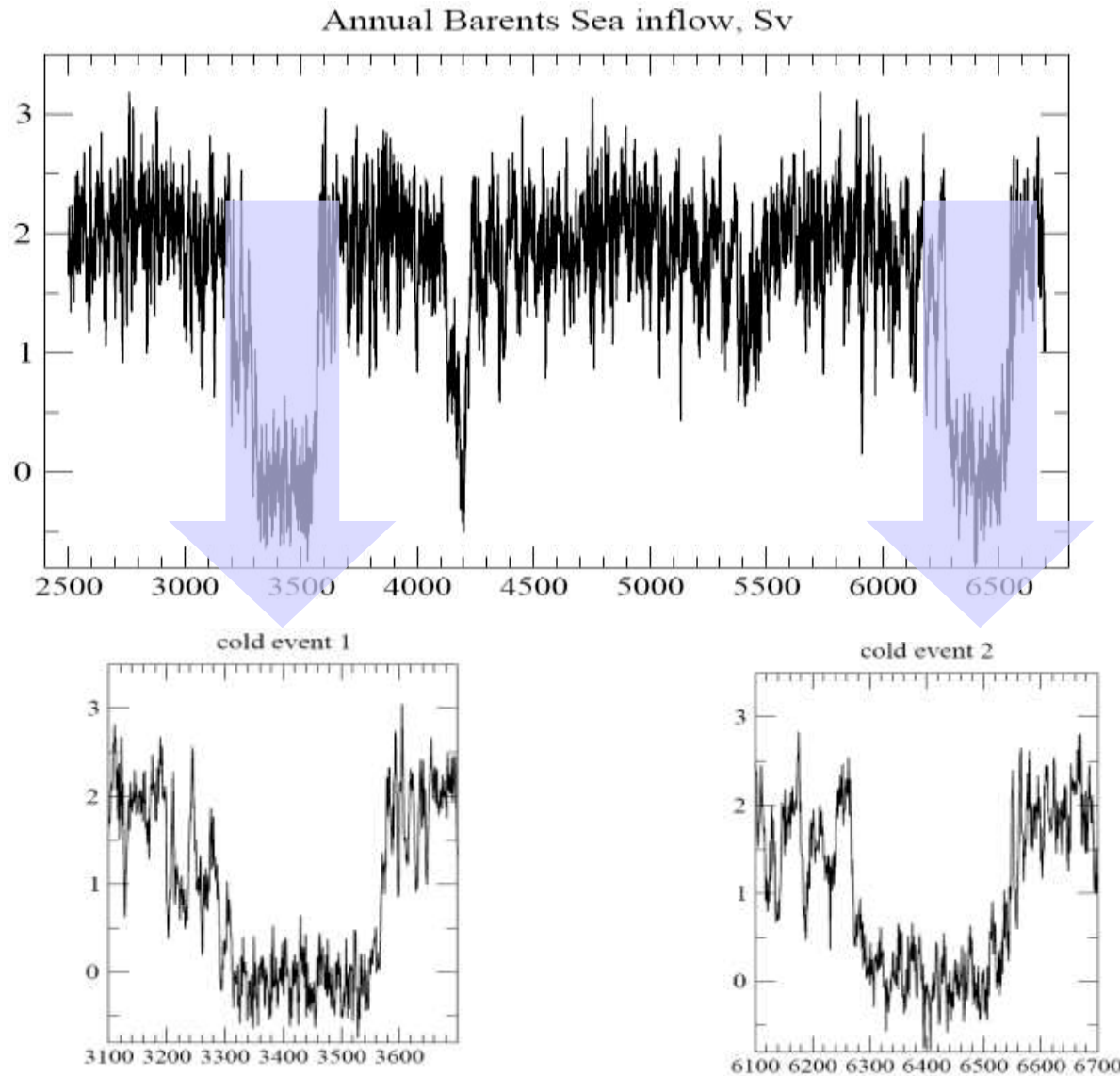
Такая положительная обратная связь может быть причиной резких изменений климата

Кильская модель климата: эксперимент с изменением солнечной постоянной

(Park et al. 2009, JCLim)

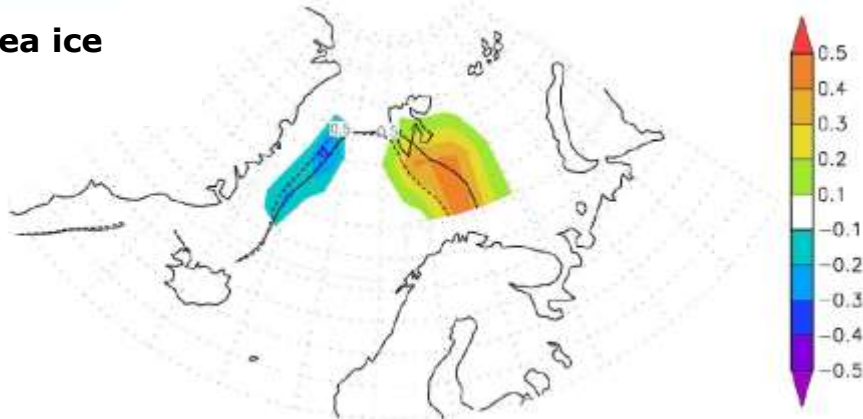


Резкое прекращение притока в Баренцевом море

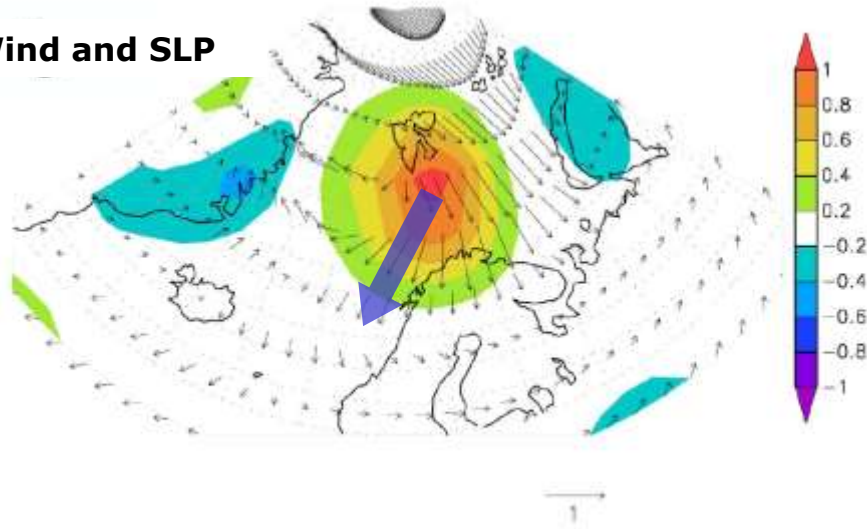


Положительная обратная связь приток-морской лед в модели

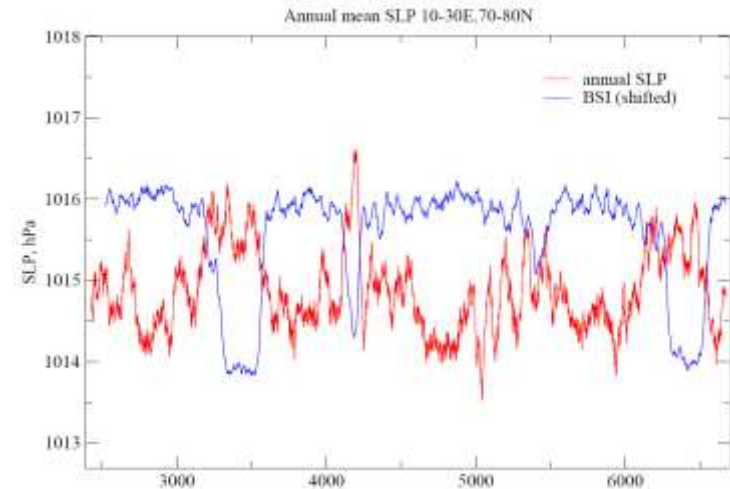
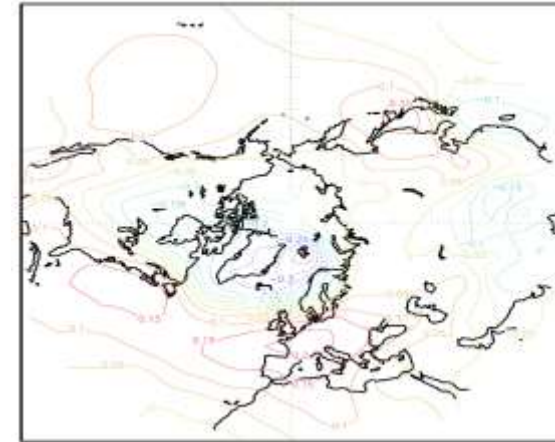
Sea ice



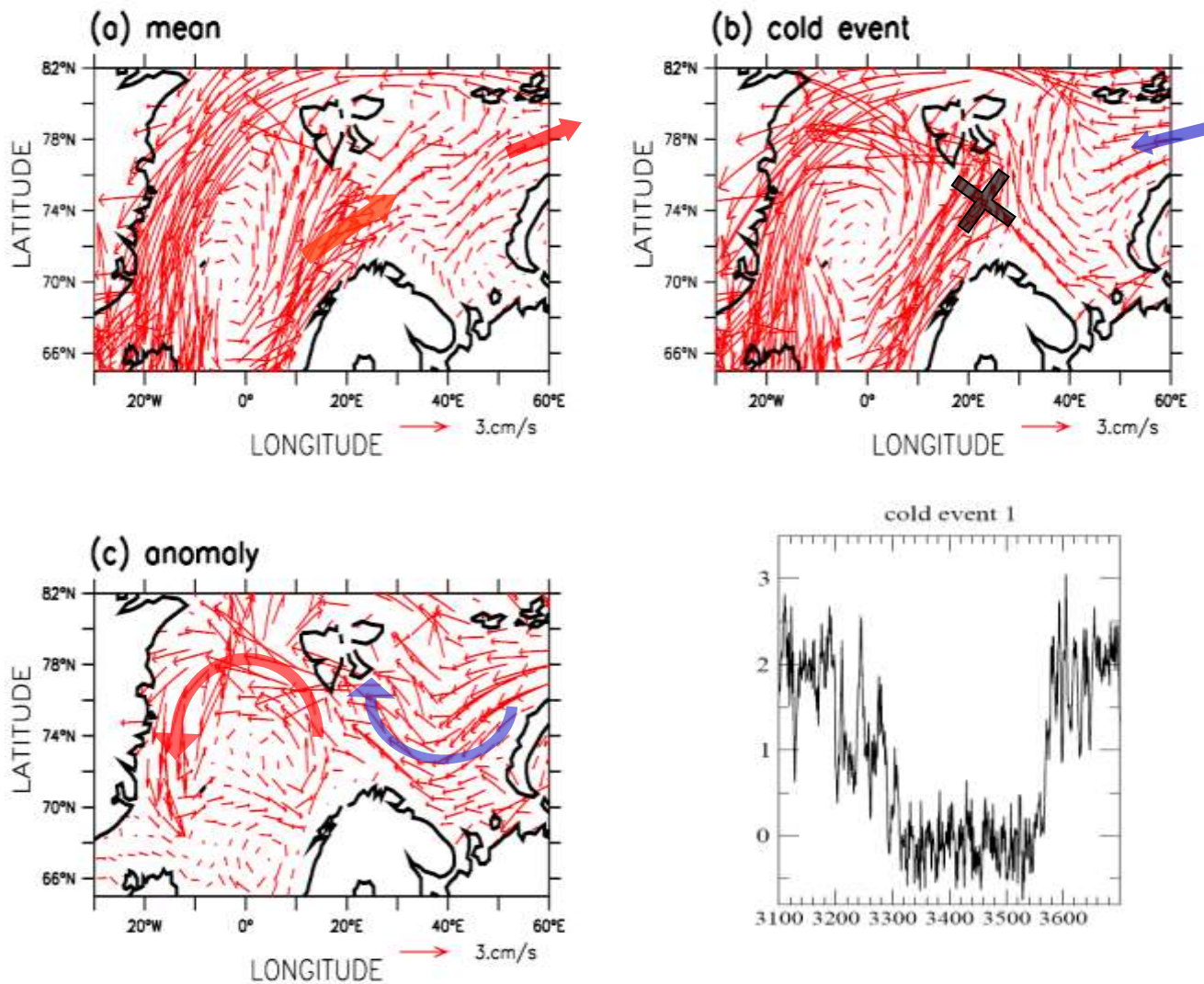
Wind and SLP



SLP-BSI (annual) correlation

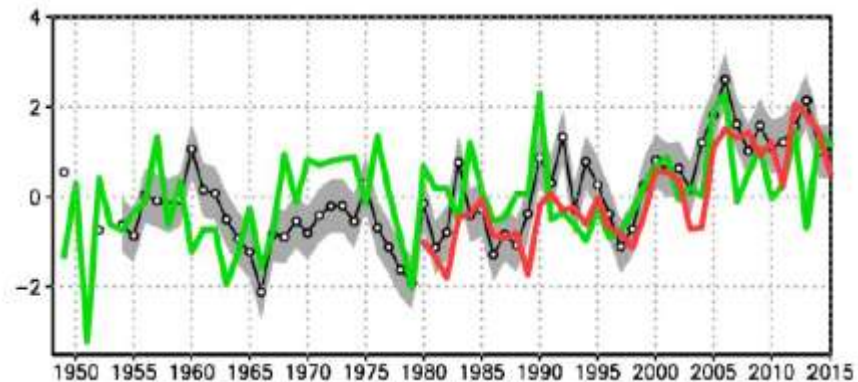
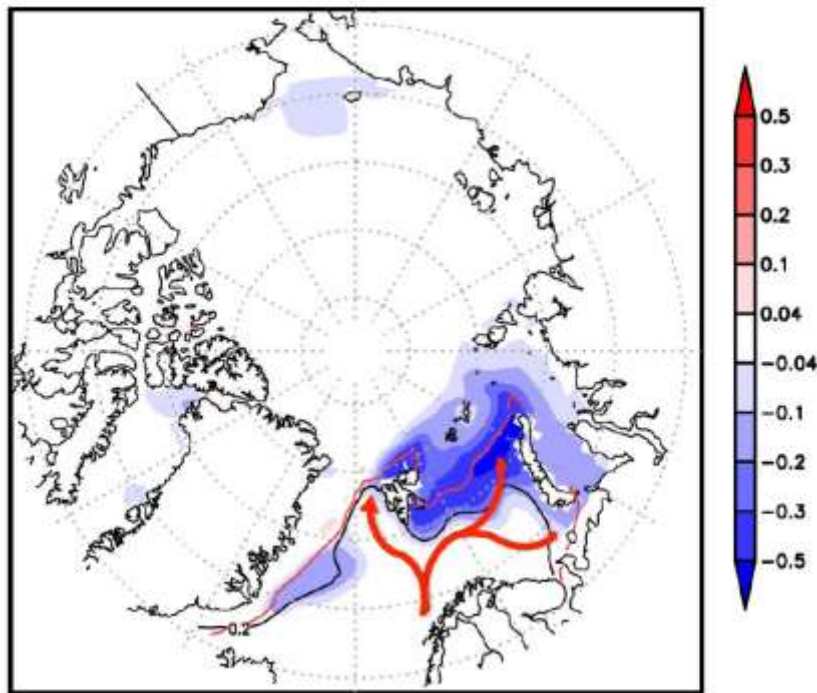


Изменения океанической циркуляции при прекращении притока



Атлантическая вода, морской лед и длинноволновая радиация

First EOF of sea ice concentration (DJF)

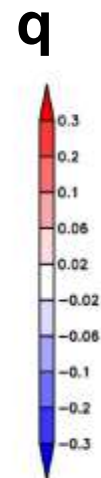
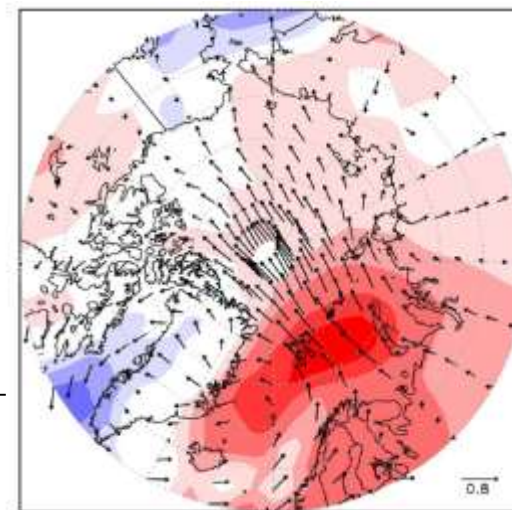
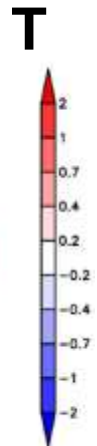
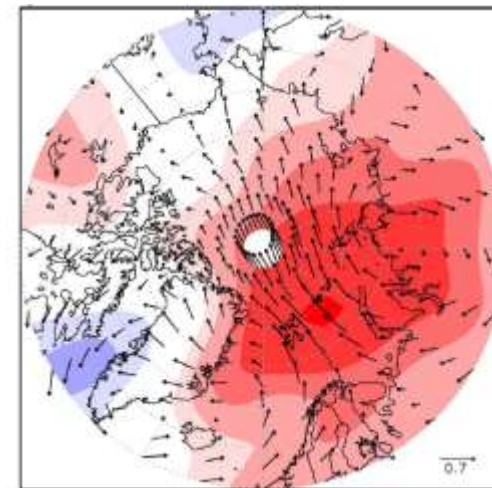
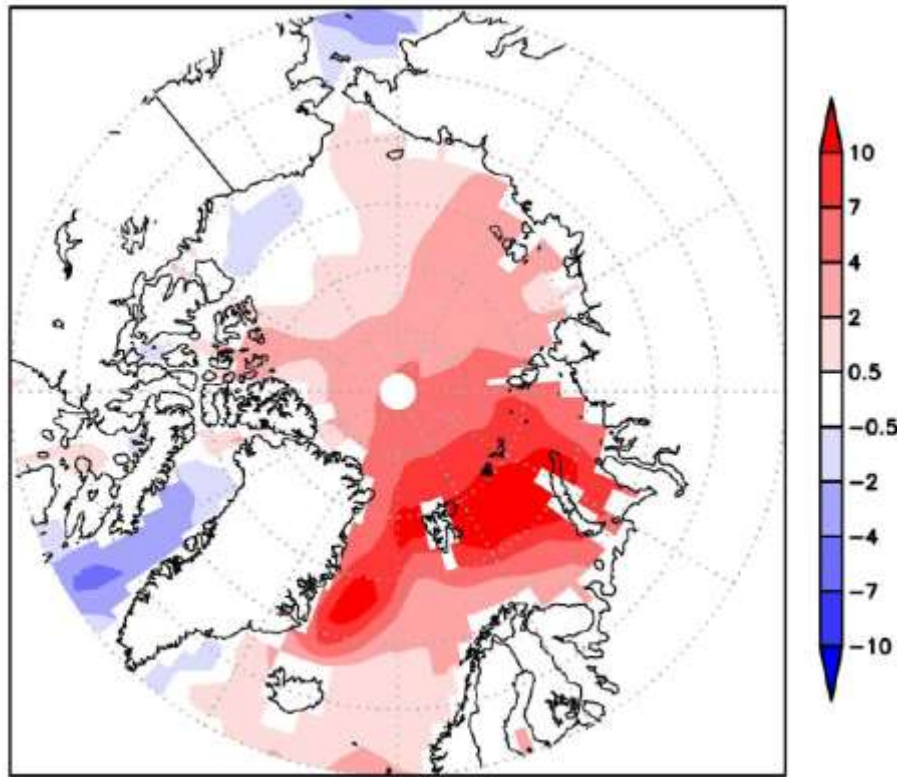


Normalized AW temperature anomaly (averaged Kola and Fram Strait sections), **normalized DLW anomaly** north of 80N for DJF, **EOF1 PC of sea ice concentration**.

Alexeev et al., 2017, ERL

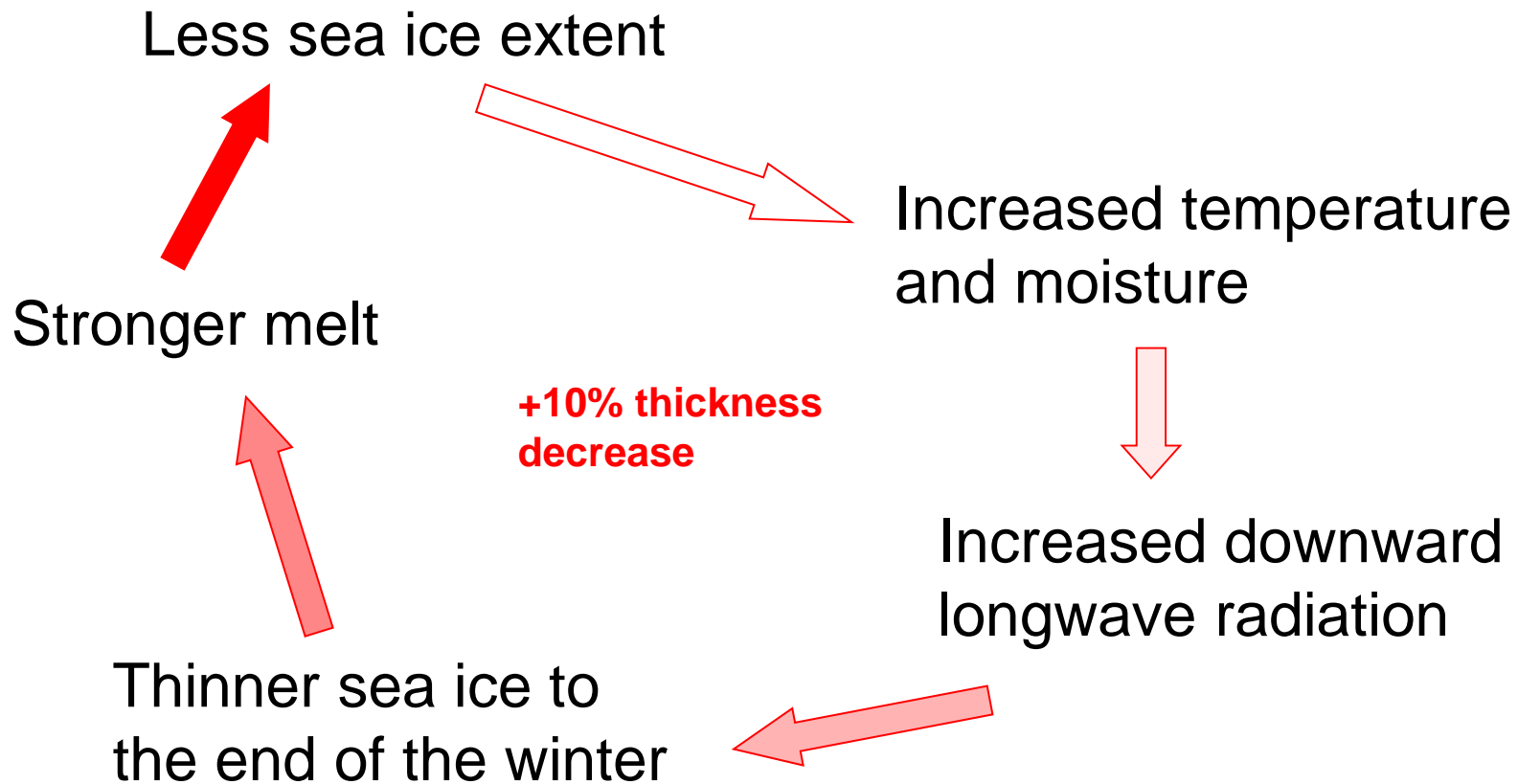
Атлантическая вода, морской лед и длинноволновая радиация

First EOF of DLW (DJF)



Regression of DLW EOF1 PC on air T and q (1000-700mb). Vectors are regressions on sensible and latent heat fluxes

Атлантическая вода, морской лед и длинноволновая радиация



Alexeev et al., 2017, ERL

На вековых временных масштабах арктическое усиление связано с рядом радиационных положительных обратных связей.

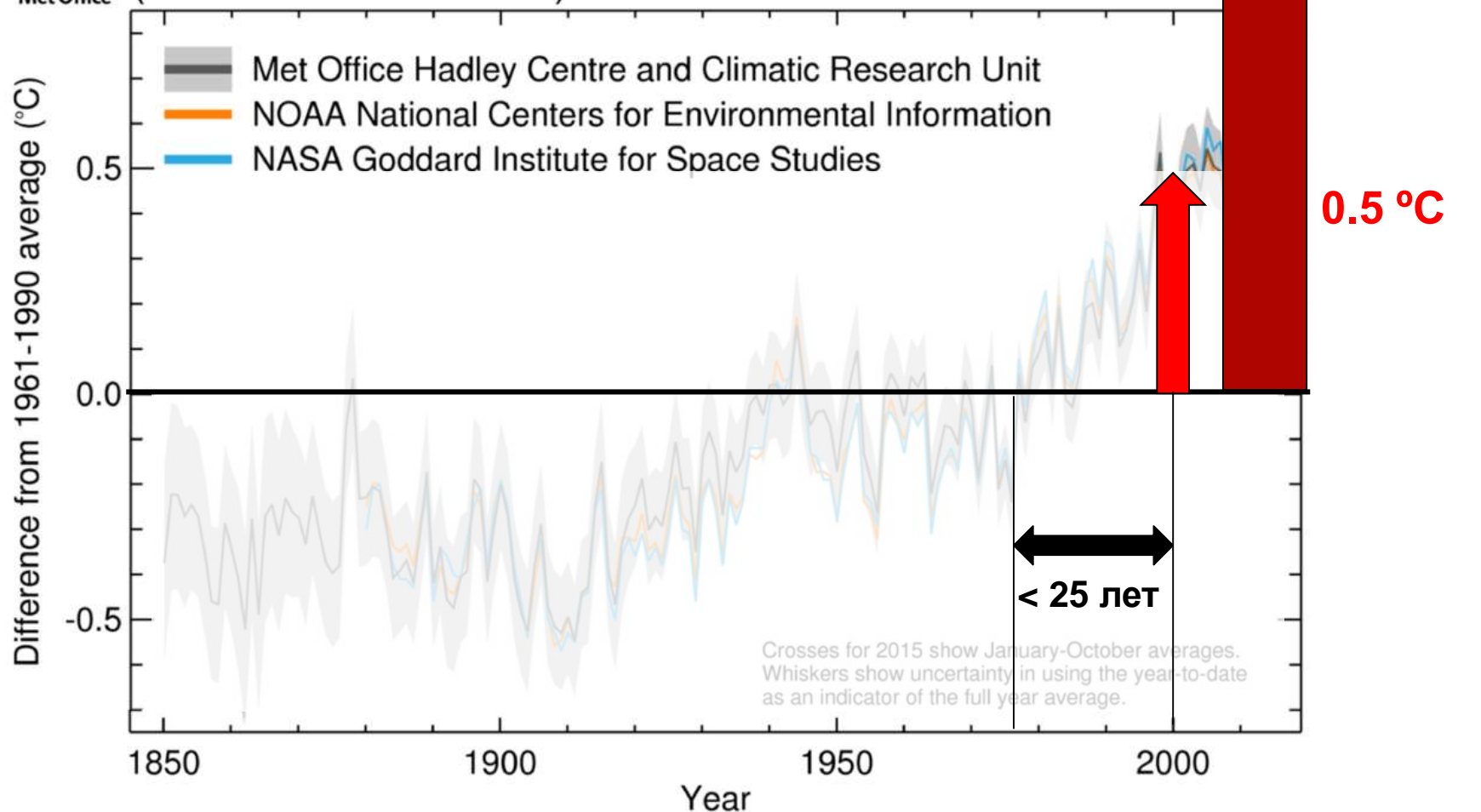
На декадном и междекадном временном масштабе усиление колебаний климата в Арктике связано главным образом с динамическими положительными обратными связями.

Важную роль играют процессы в регионе Баренцева моря вследствие вариаций притока атлантической воды и ряда положительных обратных связей.

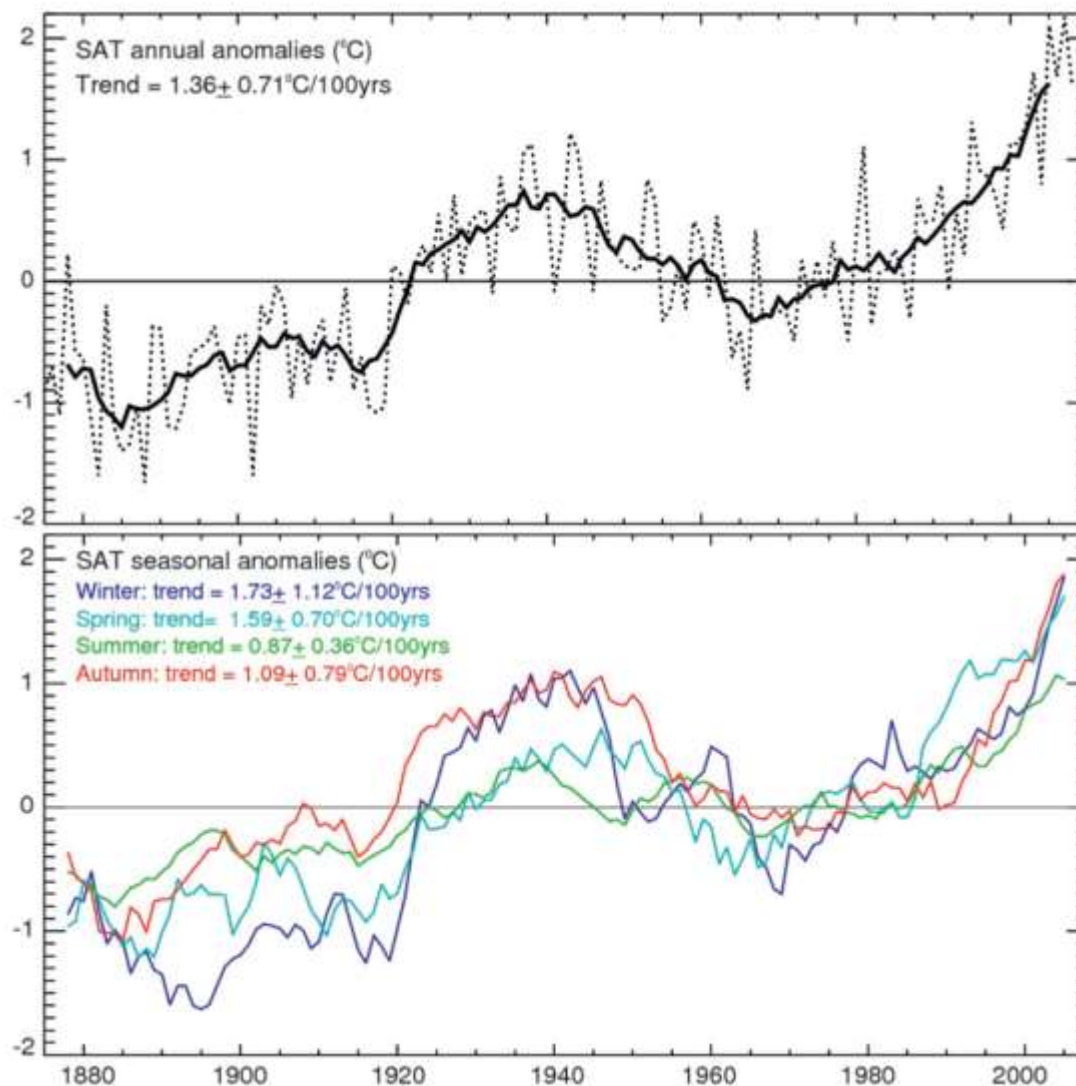
Спасибо!



Global average temperature anomaly (1850 - October 2015)

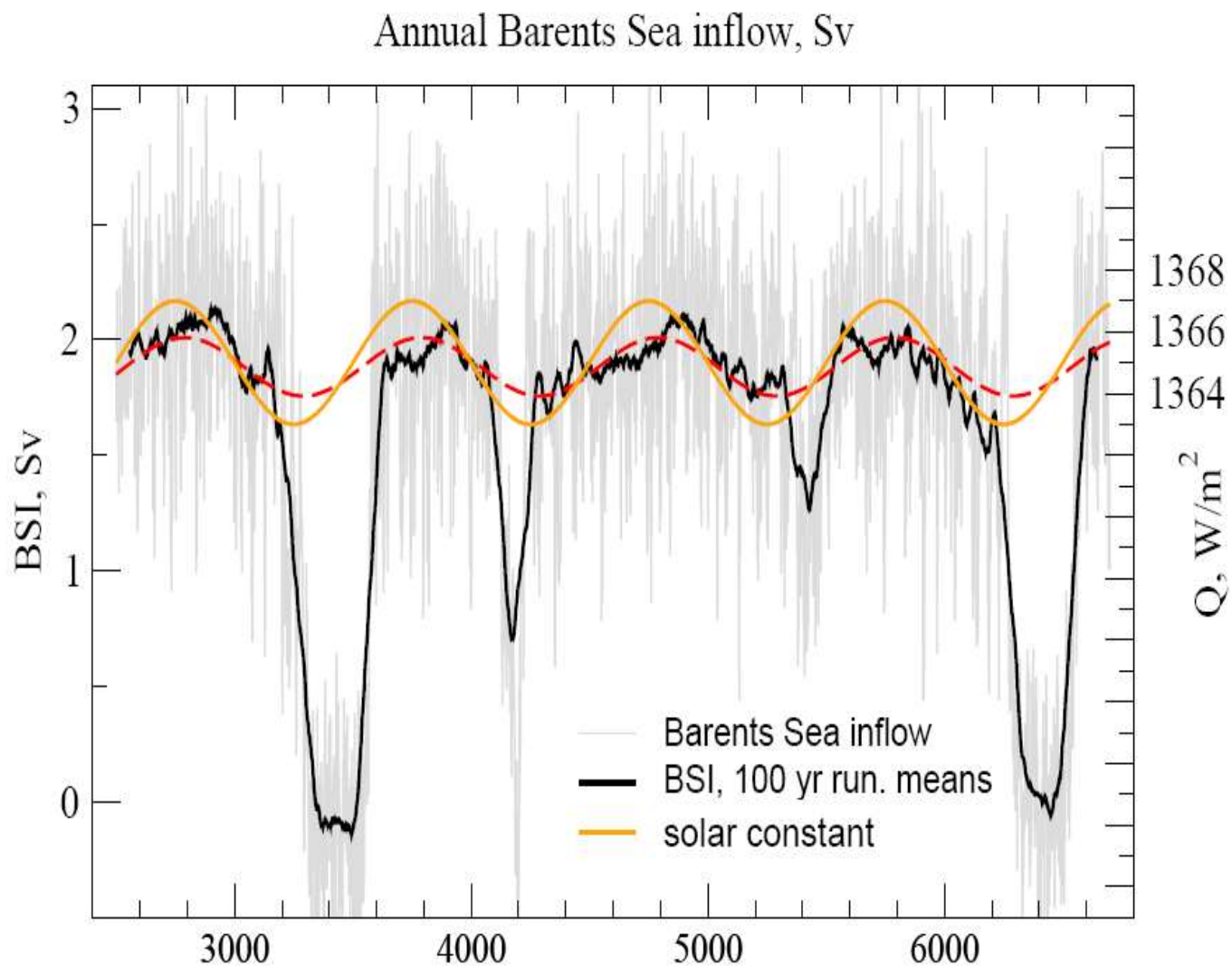


Seasonality of Arctic temperature changes



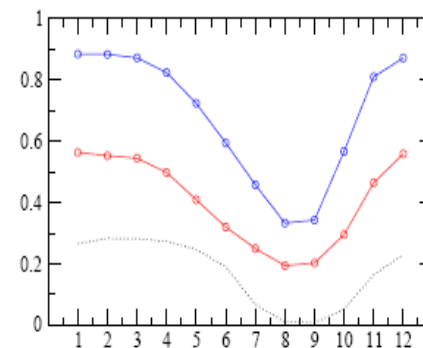
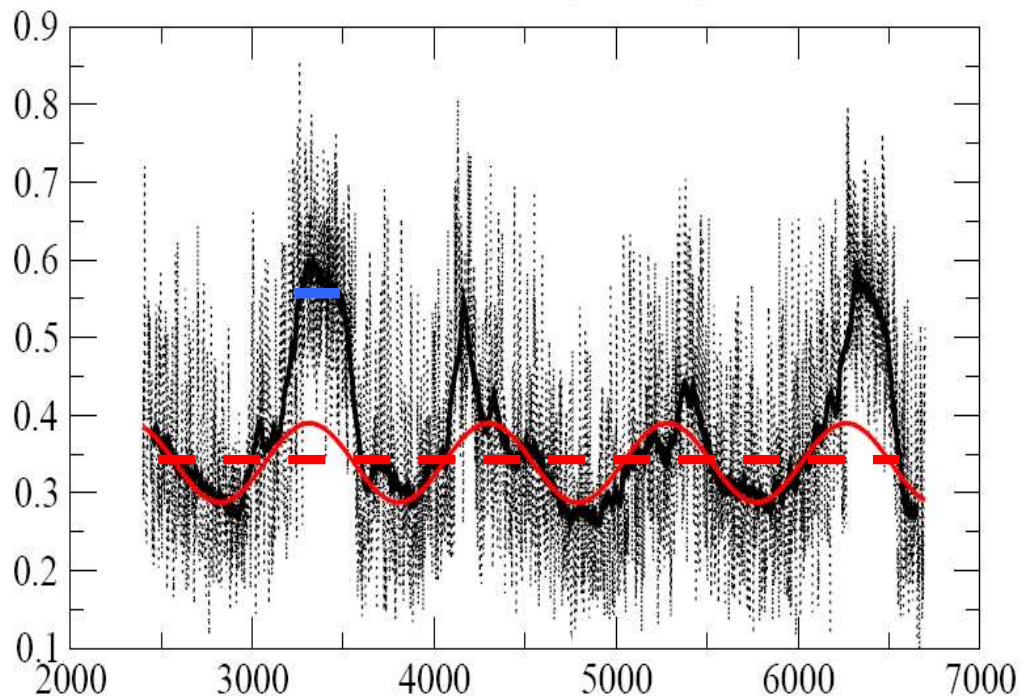
Bekryaev et al. 2010, JC

Barents Sea inflow: KCM solar simulation

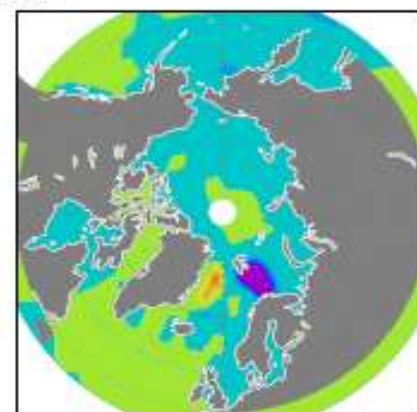


KCM solar: ice cover in the western Barents Sea

Annual sea ice fraction, 15-35E,70-80N

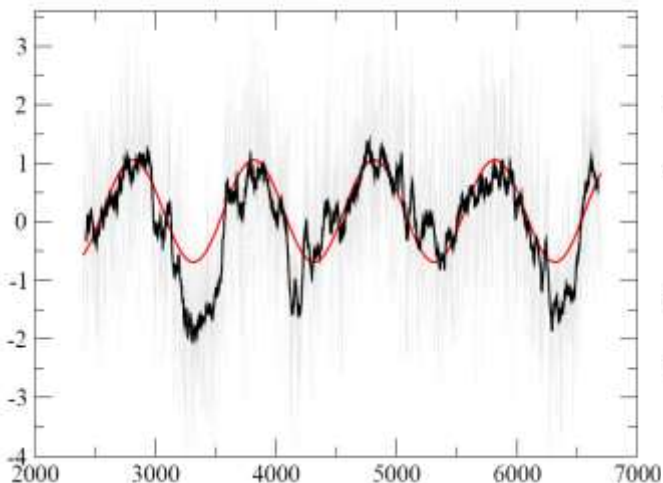


○ "warm" <2500-3199>
 ○ "cold" <3321-3550>
 - - - AMIP clim 1987-2006

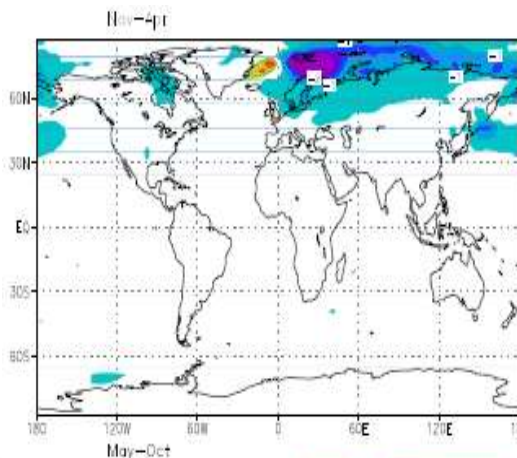


KCM solar: temperature response

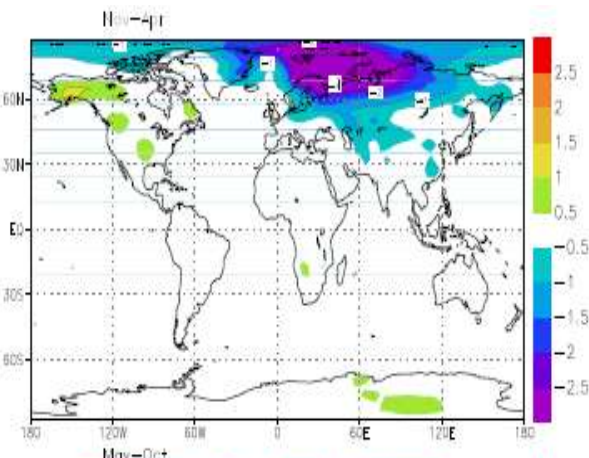
Annual SAT anomaly 10-60E,65-80N (detrended)



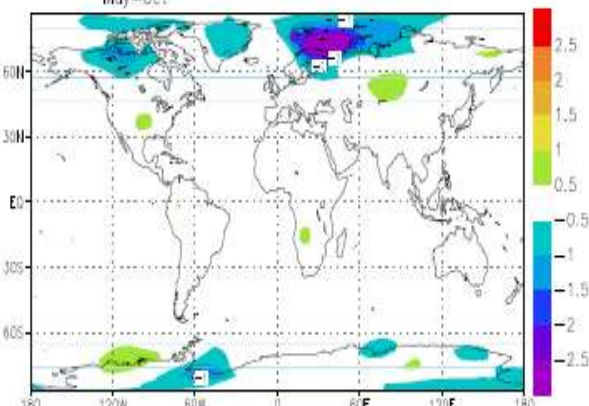
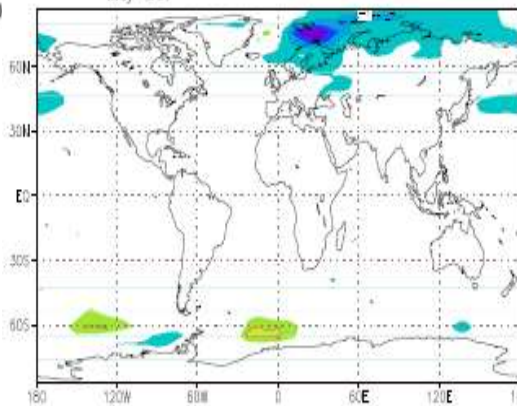
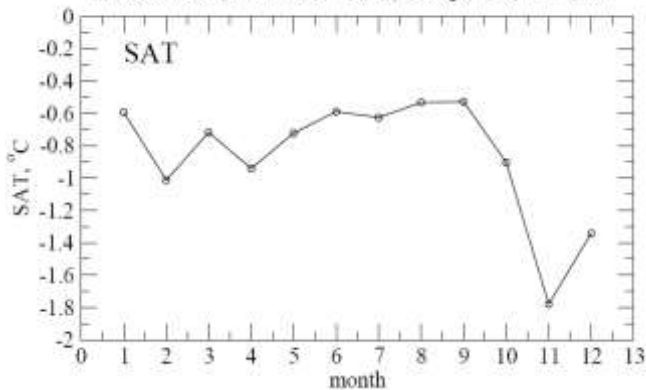
KCM SAT: "cold"- mean



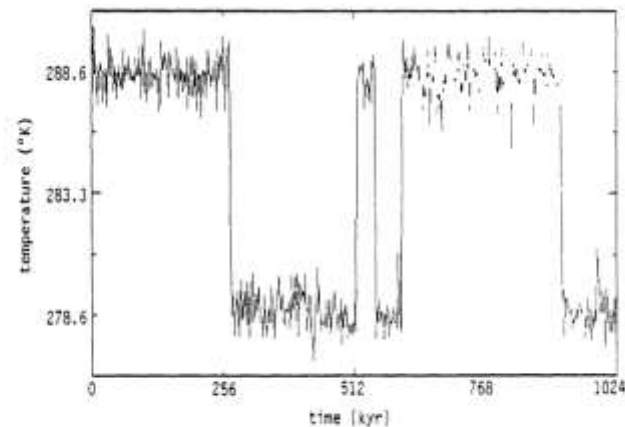
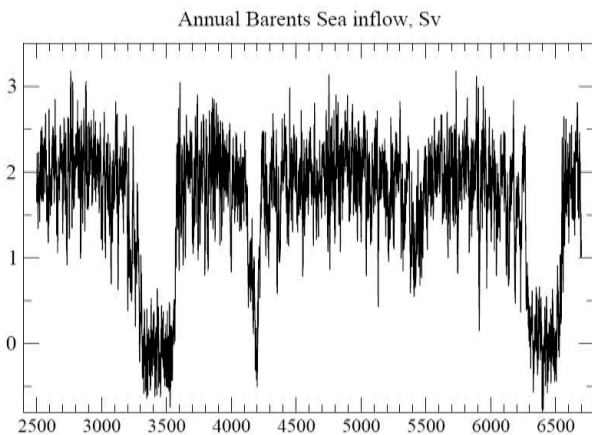
ECHAM SAT: "cold"- "real mean"



KCM P90 solar, <3321-3550> - <2500-3199>
Scandinavian (10E-40E,60N-70N) change "cold" - "warm"



BSI shutdown: stochastic resonance?



Benzi et al. 1982
Nicolis 1982

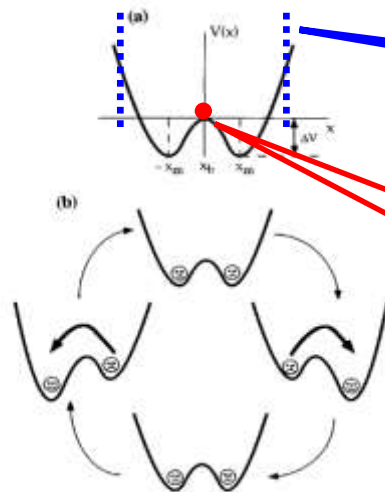


FIG. 1. Stochastic resonance in a symmetric double well. (a) Sketch of the double-well potential $V(x) = (1/4)bx^4 - (1/2)ax^2$. The minima are located at $\pm x_m$, where $x_m = (a/b)^{1/2}$. These are separated by a potential barrier with the height given by $\Delta V = a^2/(4b)$. The barrier top is located at $x_b = 0$. In the presence of periodic driving, the double-well potential $V(x,t) = V(x) - A_0 x \cos(\Omega t)$ is tilted back and forth.

FIG. 3. Numerical integration for Case 2 of Table 1. Note that the noise level is too small to produce periodic jumping.

Boundaries
Negative feedbacks

Positive feedback
Instability point



Stochastic model for the BSI transitions

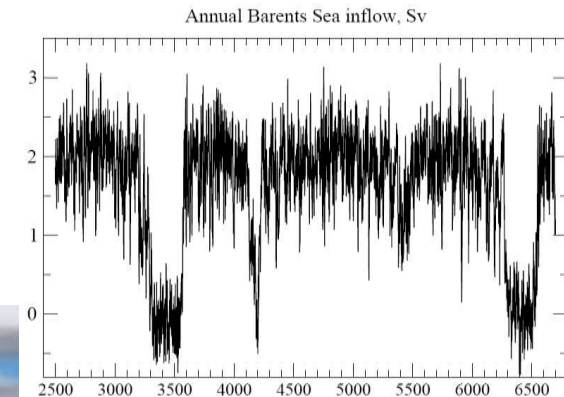
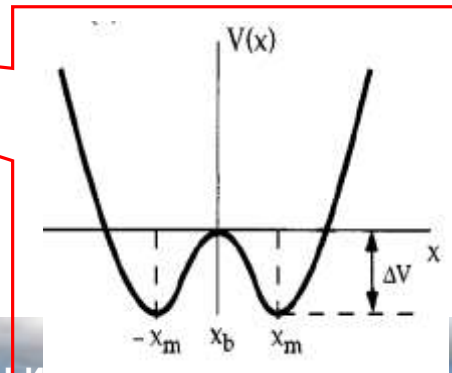
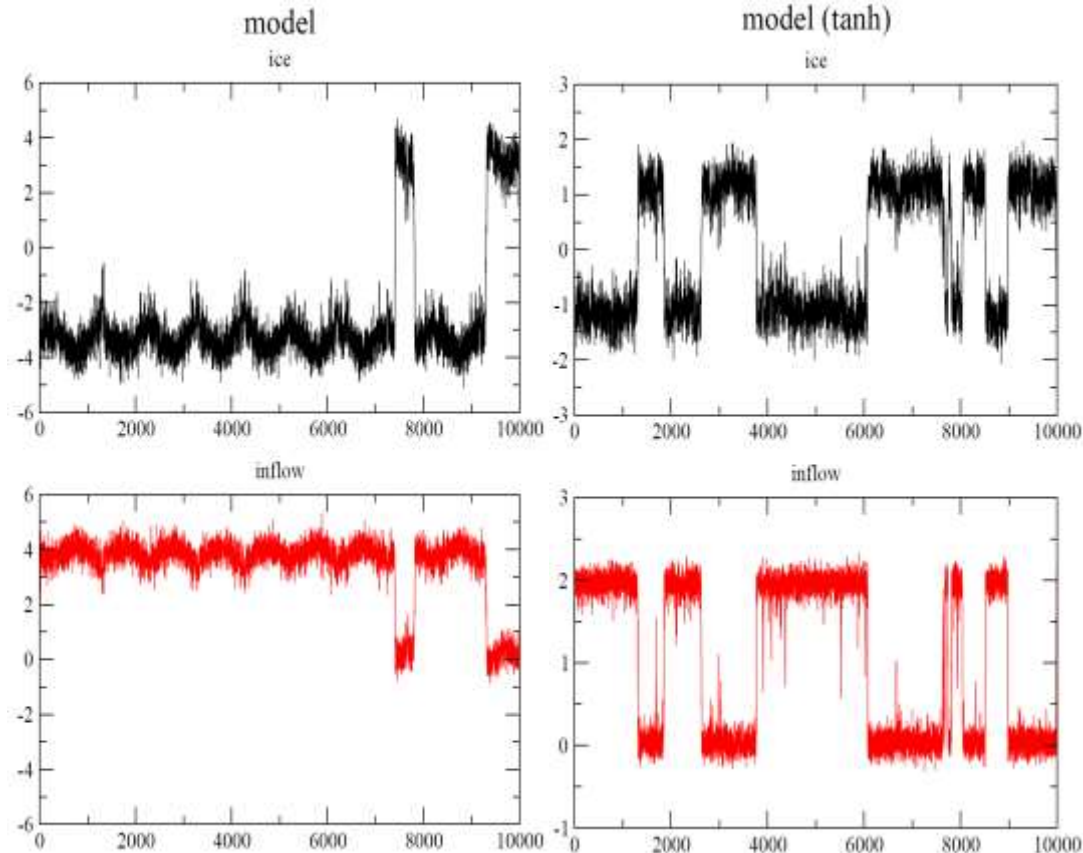
$$\begin{cases} dS/dt = -\partial U(S)/\partial S - c_1 b - c_2 \sin(\omega t) + \eta_S(t), \\ b = -c_3 S + \eta_b(t), \quad \text{OR} \quad b = -c_3 \tanh(S) + \eta_b(t), \end{cases}$$

S is sea ice area, **B** is BSI,
U(S) is potential, $U(S) = c_U S^4$,
 η_S, η_b -stochastic forcing.

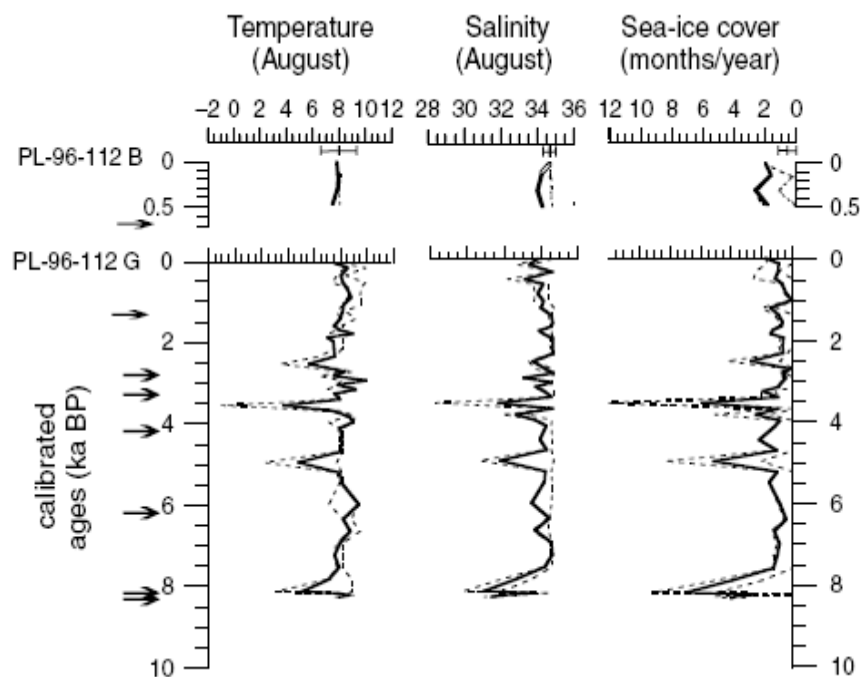
$$dS/dt = -4c_U S^3 + c_1 c_3 S - c_2 \sin(\omega t) + \eta'(t),$$

$$dS/dt = -\partial U'(S)/\partial S - c_2 \sin(\omega t) + \eta'(t),$$

$$U'(S) = c'S^4 - c''S^2$$



Holocene rapid climate changes



Voronina et al. 2001

April sea ice extent in the Barents Sea, 1850–2001

Inna Shapiro, Roger Colony & Torgny Vinje

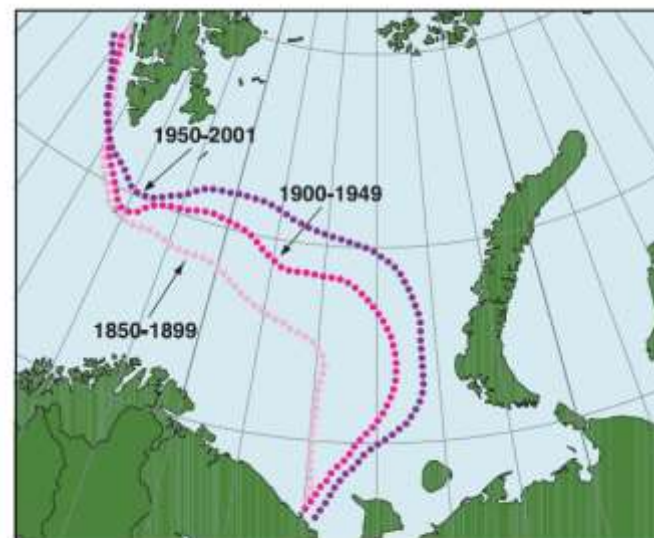
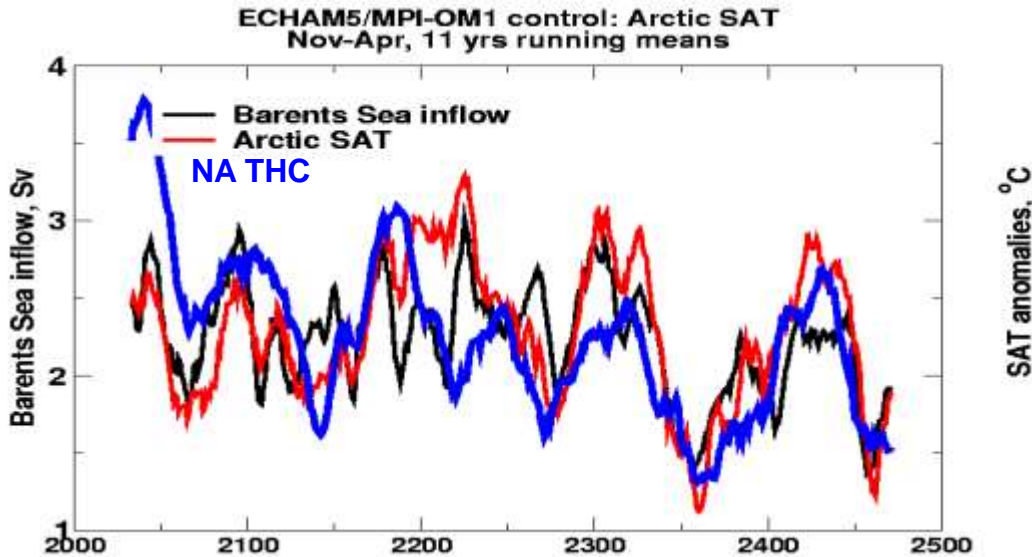


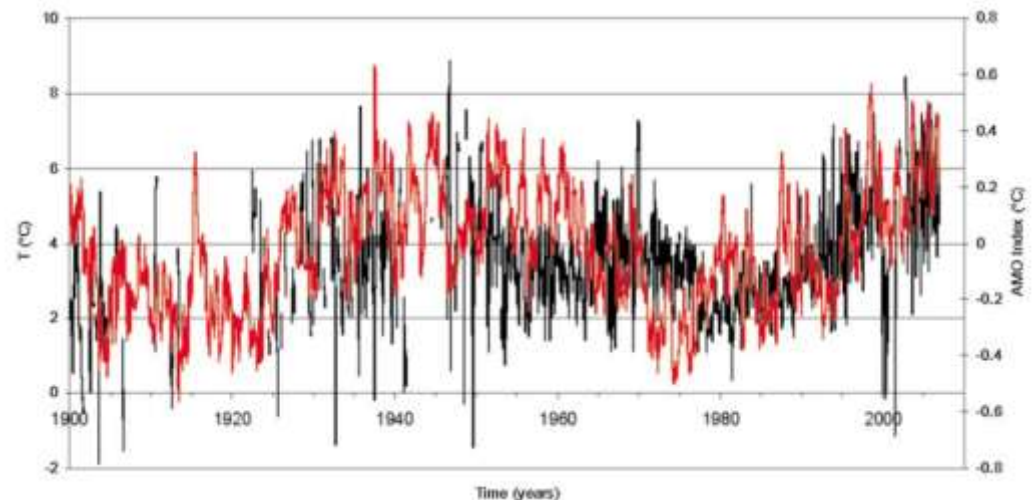
Fig. 7. Mean April ice extent: 1850–1899, 1900–1949 and 1950–2001.

Океанический приток в Баренцево море: главный фактор формирования долгопериодной климатической изменчивости в Арктике

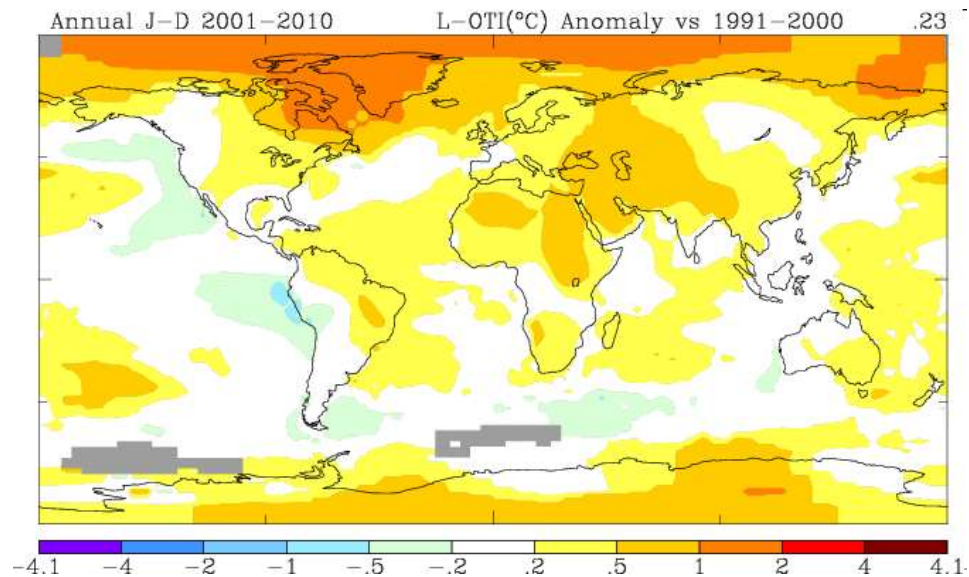


BSI, Arctic temperature and AMO in MPI climate model
(Semenov 2008)

Observed Barents Sea temperature and AMO index
(Levitus et al. 2009)



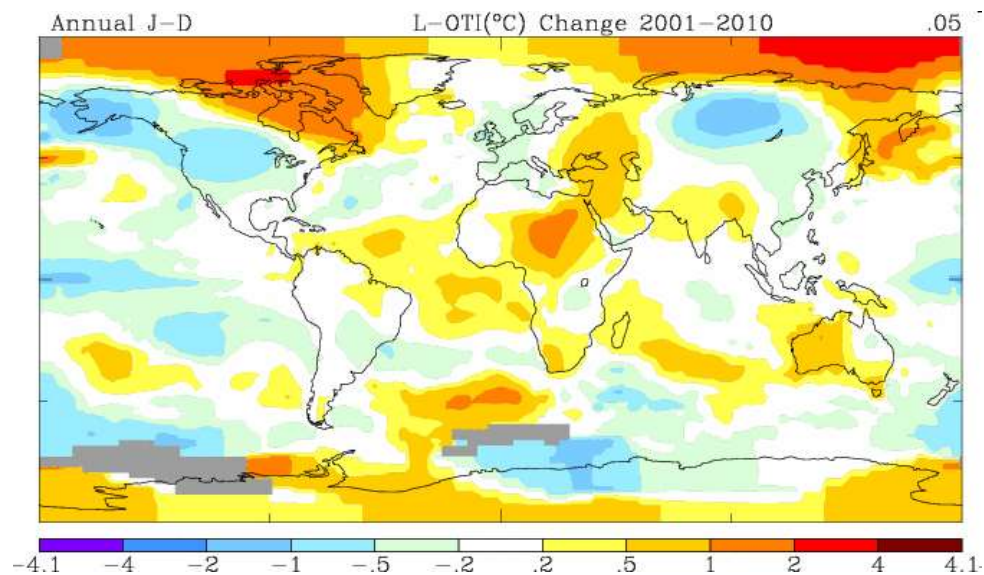
Арктической усиление глобального потепления



Temperature changes from 1991-2000 to 2001-2010

Glob.: 0.23; NH: 0.31; **Arc: 0.76**

Why does Arctic warming continue and sea ice retreat even faster despite the global warming hiatus?



Temperature trend 2001-2010

Glob.: 0.05; NH: 0.10; **Arc: 0.55**

