



Влияние солнечной активности на климат: возможные механизмы воздействия и результаты моделирования

А.В. Елисеев

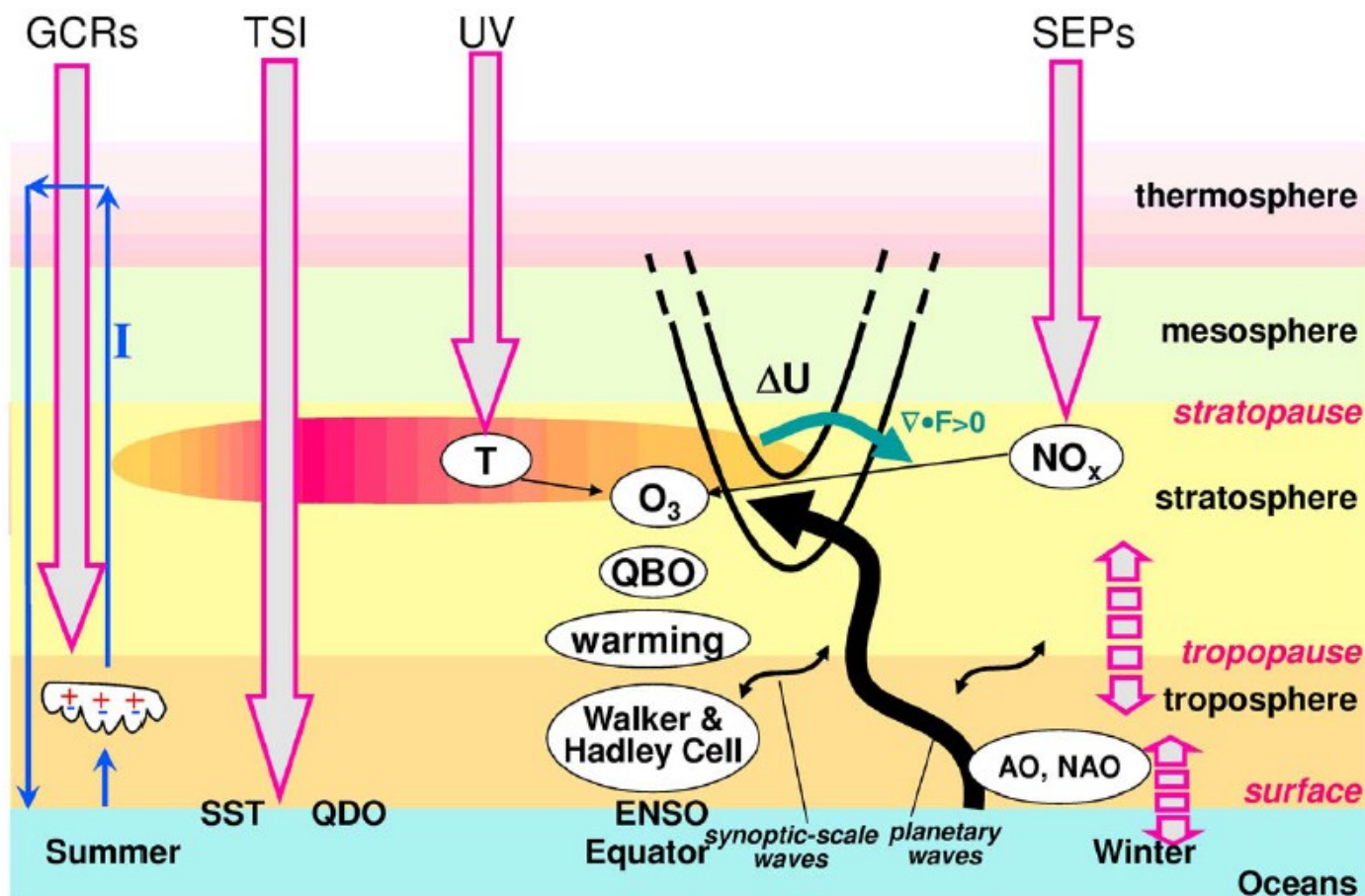
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Объединенный научный семинар
«Глобальные и региональные аспекты в изучении
климатической системы Земли»

28.11.2013

Введение

Механизмы влияния солнечной активности на земную климатическую систему [Gray et al., 2010]



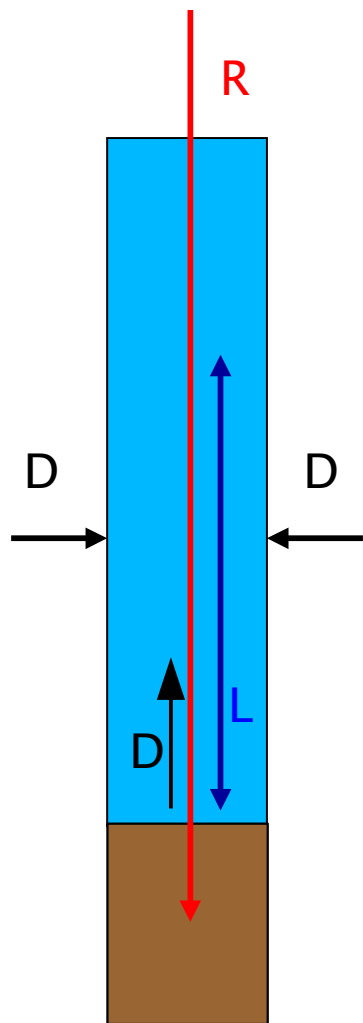
TSI — солнечная постоянная

UV — поток ультрафиолетовой радиации

GCR — поток космических лучей

SEP — солнечные протонные вспышки

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем



Термодинамическое уравнение:

$$C \frac{d \delta T}{dt} = \delta R + \delta L + \delta D$$

радиация испарение/конденсация динамика

Здесь и далее δ – отклонение от базового равновесного состояния.

При глобальном и вертикальном осреднении в линейном приближении

$$\delta R = F_{\text{РВВ}} - \lambda \delta T$$

РВВ обратные связи

Радиационное возмущающее воздействие (РВВ; радиационный форсинг) – изменение радиационного притока при фиксированном состоянии атмосферы.

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

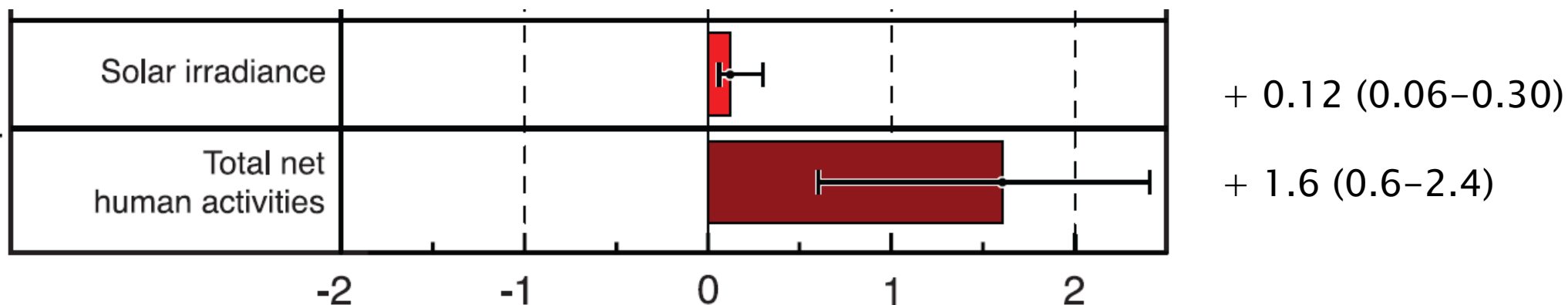
Глобальное РВВ из-за изменения солнечной постоянной S

$$R_S = \frac{1}{4} S (1 - \alpha_p)$$



$$F_S = \frac{1}{4} \delta S (1 - \alpha_p) \approx \delta S / 6$$

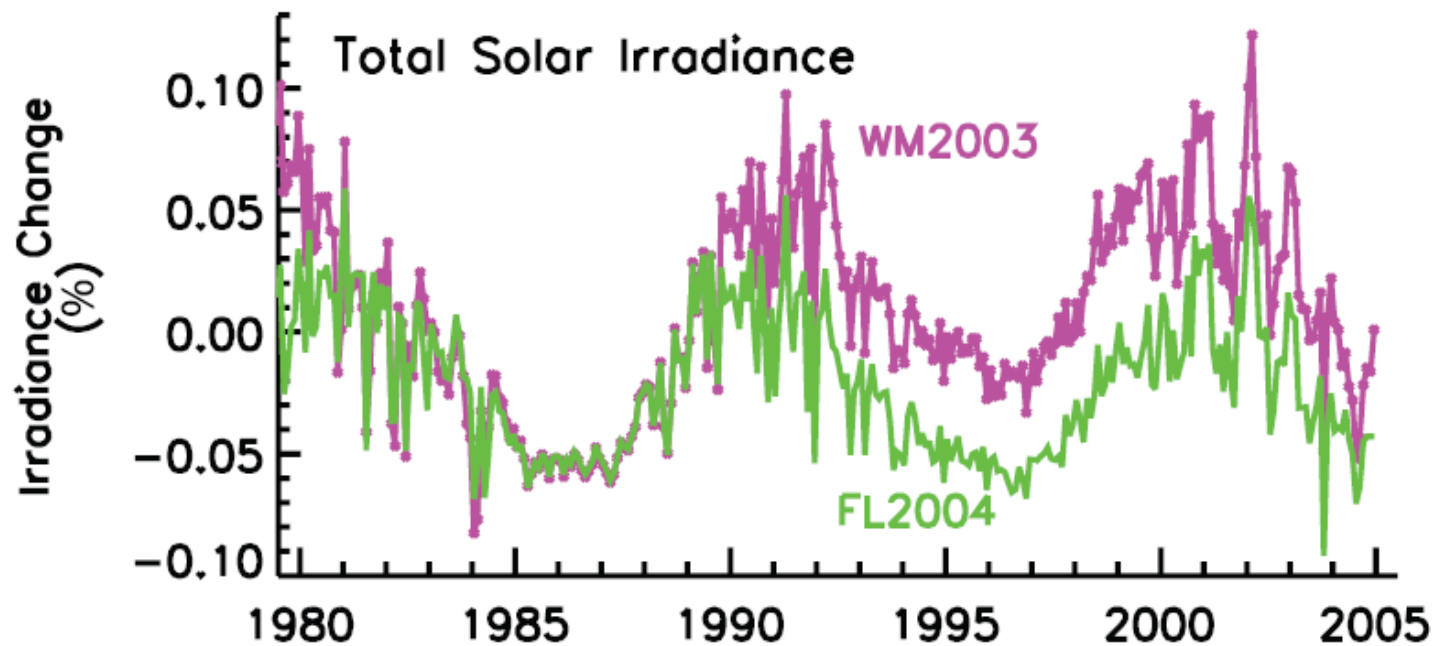
РВВ [Вт/м²] в 2005 г. относительно 1750 г. [IPCC, 2007]



1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

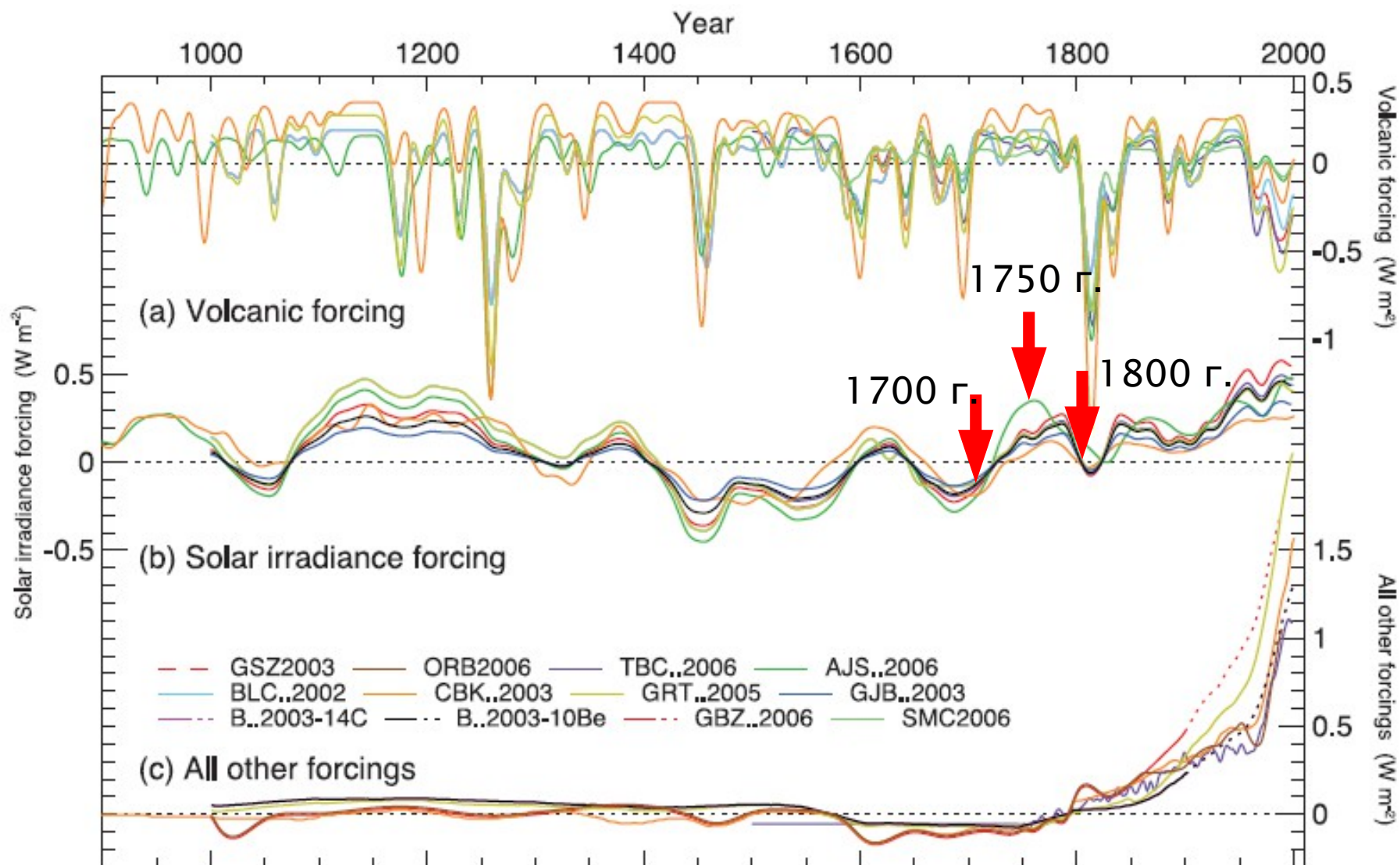
Неопределённость оценки РВВ из-за изменения солнечной постоянной (1)

Спутниковые данные ACRIM [Willson, Mordvinov, 2003] и PMOD [Frölich, Lean, 2004]



1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

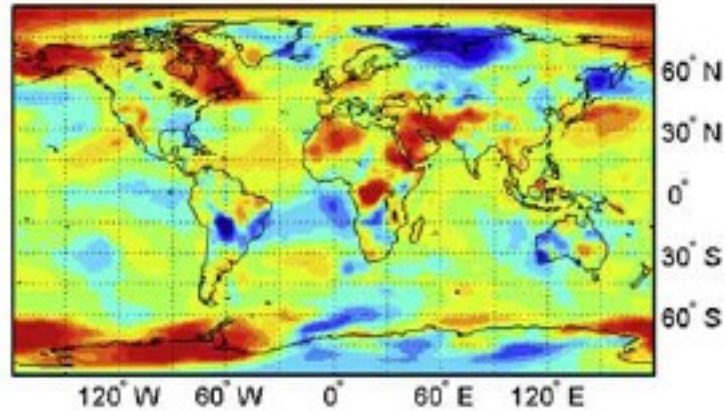
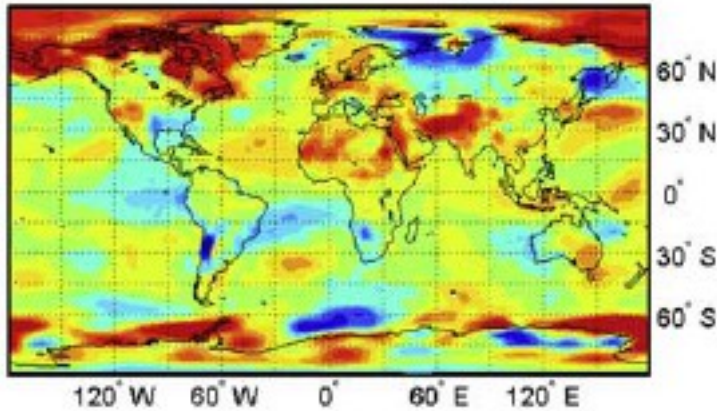
Неопределённость оценки РВВ из-за изменения солнечной постоянной (2) [IPCC, 2007]



1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

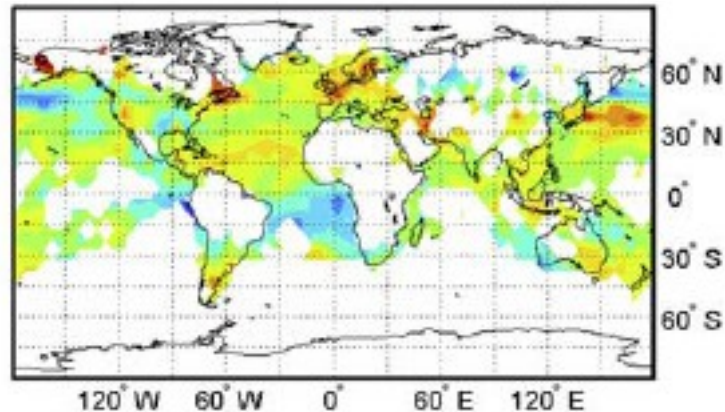
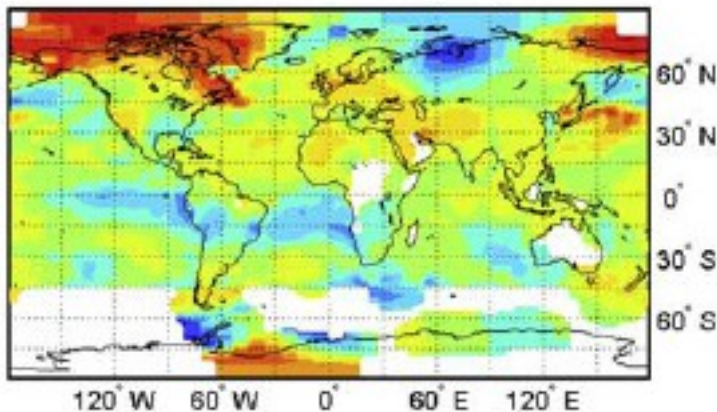
Отклик приповерхностной температуры атмосферы [K] на 11-летний солнечный цикл ($S_{\max} - S_{\min}$), 1959–2004 гг. [Tung et al., 2008]

NCER: $\kappa = 0.17 \pm 0.04 \text{ K м}^2 / \text{Вт}$ ERA-40: $\kappa = 0.12 \pm 0.02 \text{ K м}^2 / \text{Вт}$

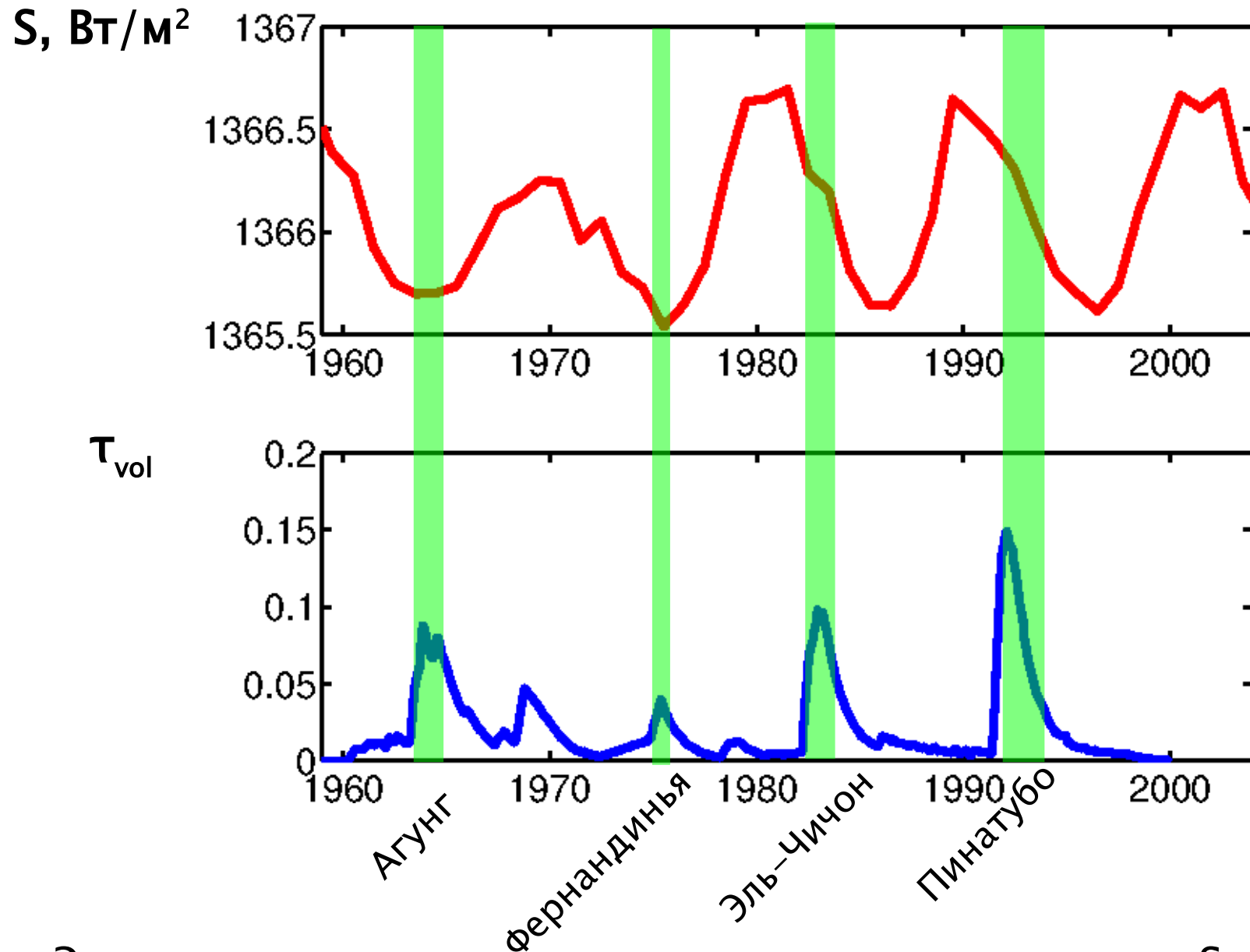


$$\kappa = \partial T / \partial S$$

GISS: $\kappa = 0.12 \pm 0.03 \text{ K м}^2 / \text{Вт}$ HadCRUT3: $\kappa = 0.12 \pm 0.02 \text{ K м}^2 / \text{Вт}$



1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем



Эруптивные извержения происходили в периоды S_{\min}



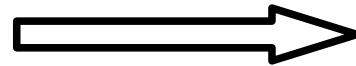
оценки $\kappa = \partial T / \partial S$ завышены

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Оценка вклада δS в изменение T_g в XVII–XX веках.

По данным реконструкции S [Wang et al., 2005] за период от маундеровского минимума до солнечного цикла 23

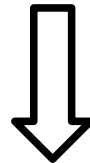
$$\delta S = 1.1 \text{ Вт/м}^2$$



$$P_{\text{ВВ}} = 0.2 \text{ Вт/м}^2$$

Для современных климатических моделей параметр равновесной чувствительности климата

$$\lambda = \delta T_g / P_{\text{ВВ}} = 0.5 - 1.2 \text{ К м}^2 / \text{Вт}$$



Равновесный отклик на увеличение S от маундеровского минимума до конца XX века

$$\delta T_g = 0.1 - 0.2 \text{ К}$$

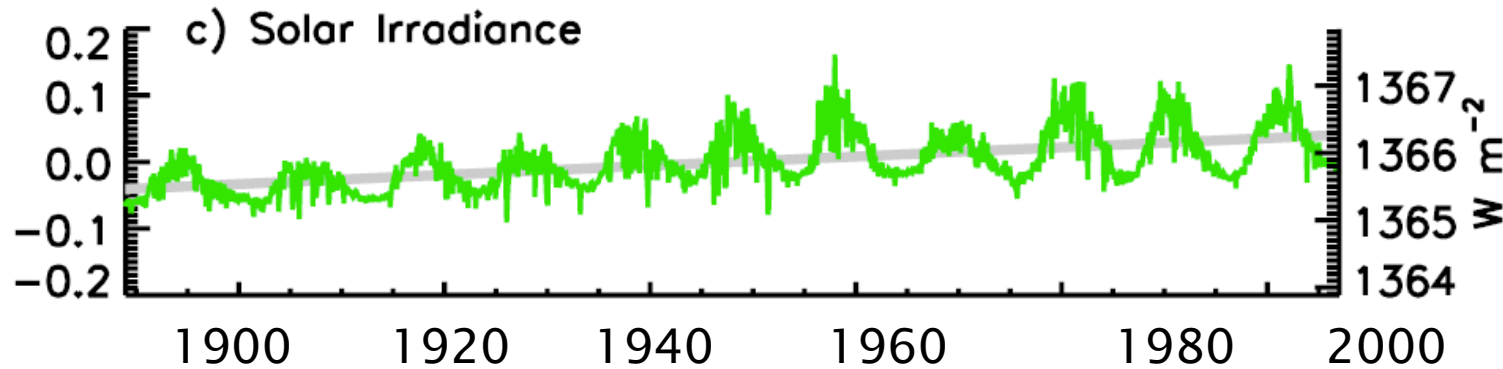
намного меньше увеличения T_g в XX веке ($\sim 0.6-0.7 \text{ К}$).

Транзитивный отклик T_g оказывается ещё меньше из-за инерционности климата.

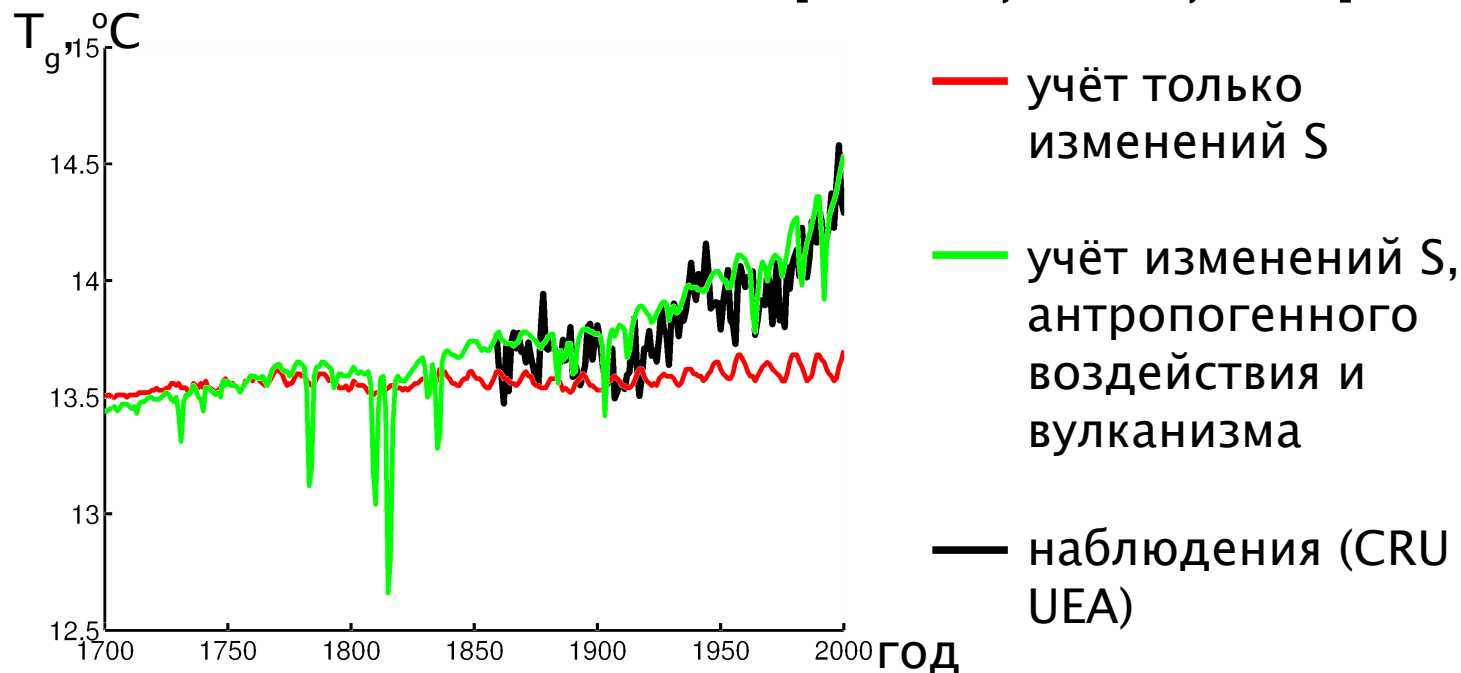
1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Вклад δS в изменение T_g в XIX–XX веках.

Эмпирическая оценка с использованием данных HadCRUT3 для температуры и [Wang et al., 2005] для S [Lean, Rind, 2008]



Расчёты с КМ ИФА РАН [Елисеев, Мохов, 2008]



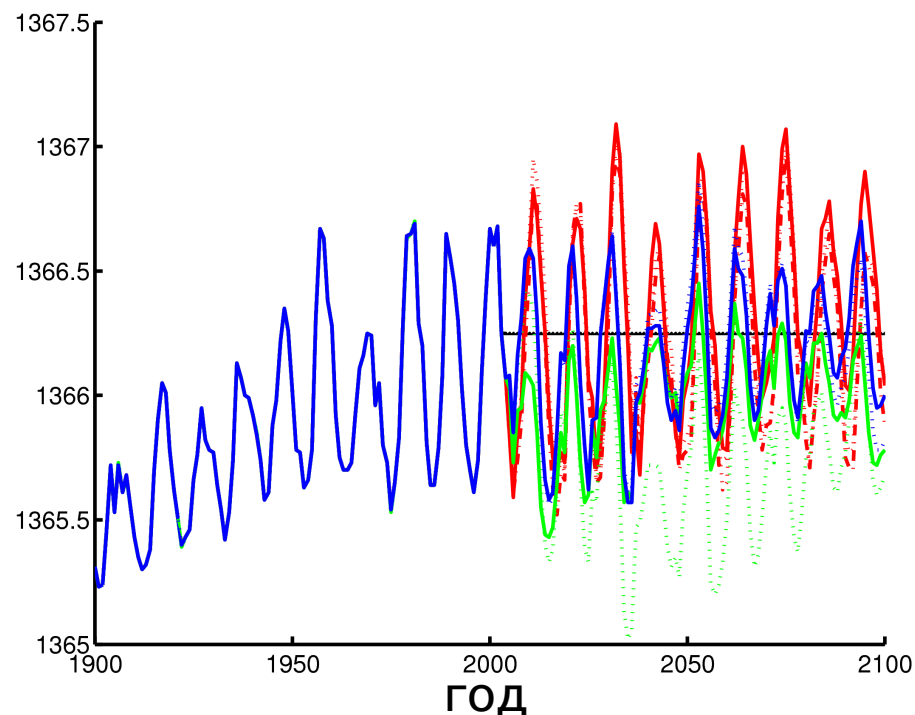
$\leq 0.1 \text{ K}$

⇒ (~ 15% от роста T_g в XX веке)

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

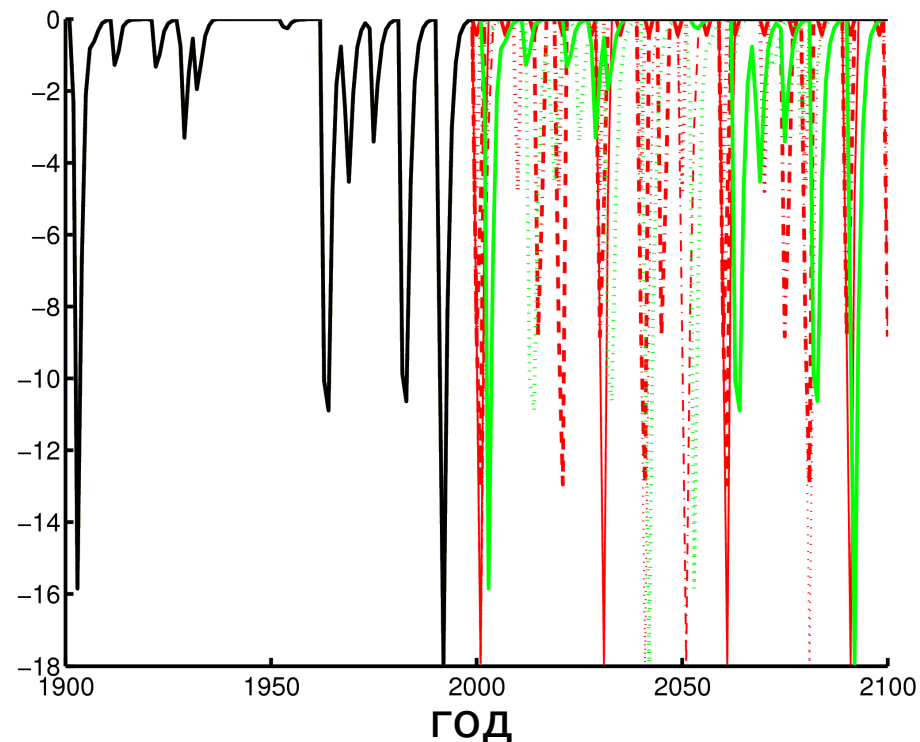
Сценарии ИФА РАН для изменения естественного РВВ в XXI веке [Мохов и др., 2008]

S [Вт/м²]



Сценарии для S построены на основе реконструкции [Wang et al., 2005] с экстраполяцией на XXI веке в предположении циклических вариаций S (авторегрессионный процесс). Дополнительно рассмотрен сценарий $S = \text{const}$ в XXI веке.

вулканическое РВВ [Вт/м²]

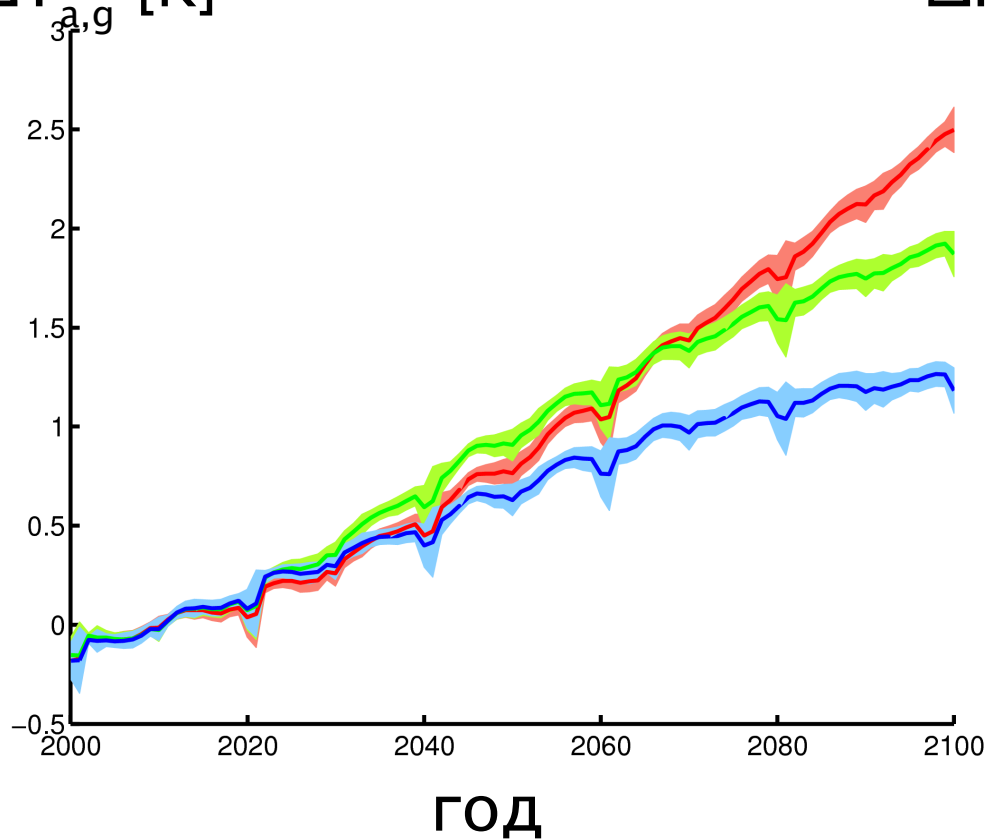


Сценарии для вулканического РВВ построены с использованием реконструкции оптической толщины стратосферного аэрозоля [Amman et al., 2003] с использованием повторения/перстановки данных для XX века в XXI веке.

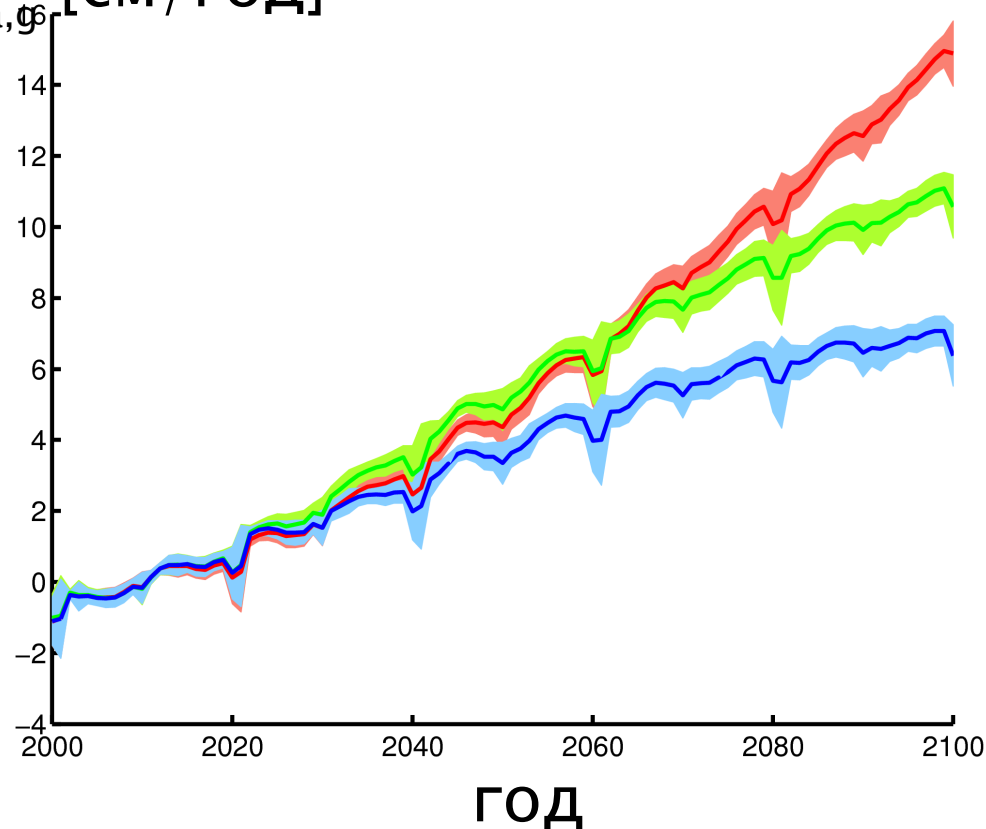
1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Отклик на внешние воздействия (естественные + антропогенные SRES) [Мохов и др., 2008]

$\Delta T_{a,g}$ [K]



$\Delta P_{a,g}$ [см/год]



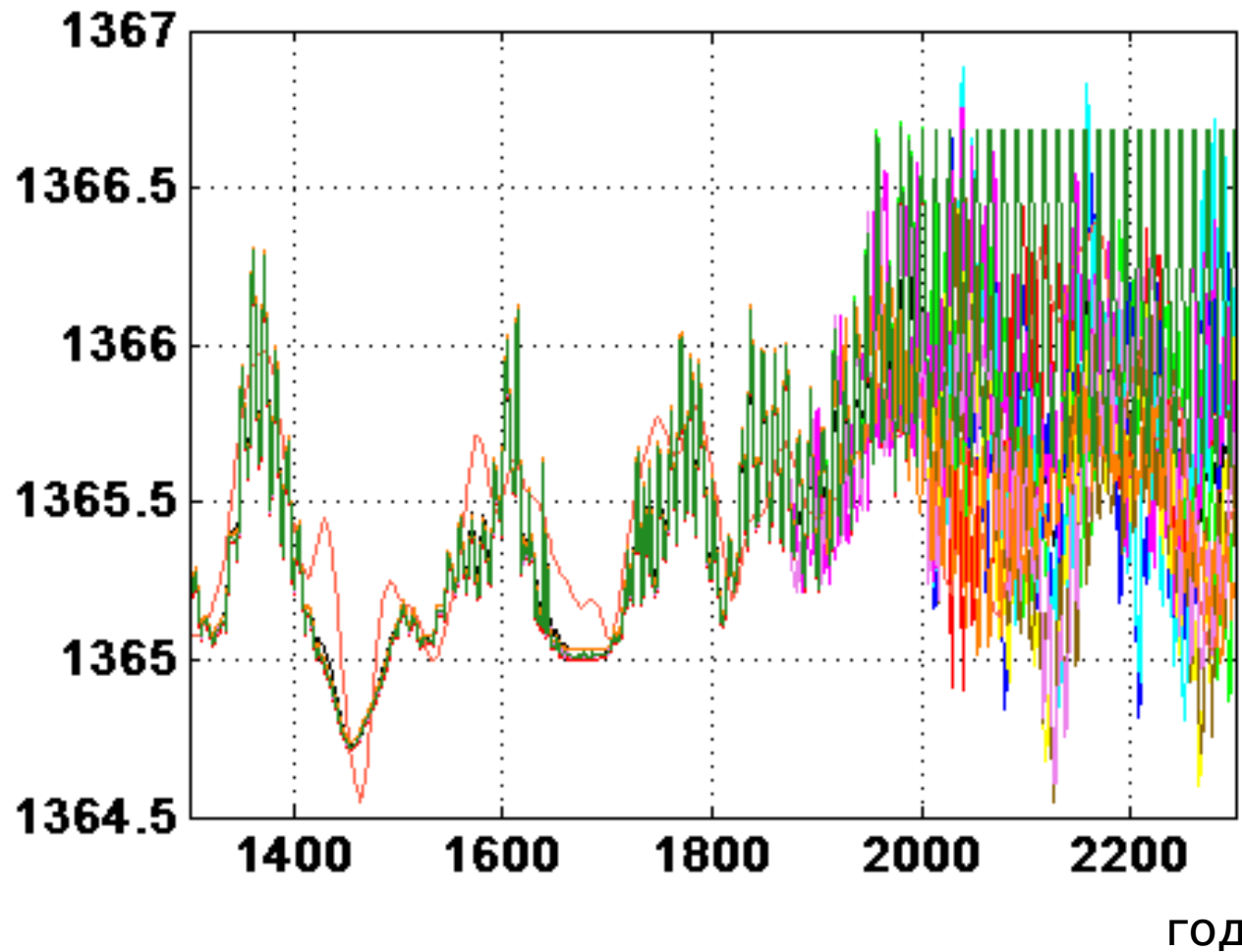
- КМ ИФА РАН, SRES B1
- КМ ИФА РАН, SRES A1B
- КМ ИФА РАН, SRES A2

линии: ансамблевое среднее
штриховка: внутриансамблевое СКО

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Сценарии ИФА РАН для изменения солнечной постоянной в XXI–XXIII веках [Mokhov et al., 2012]

S [Вт/м²]



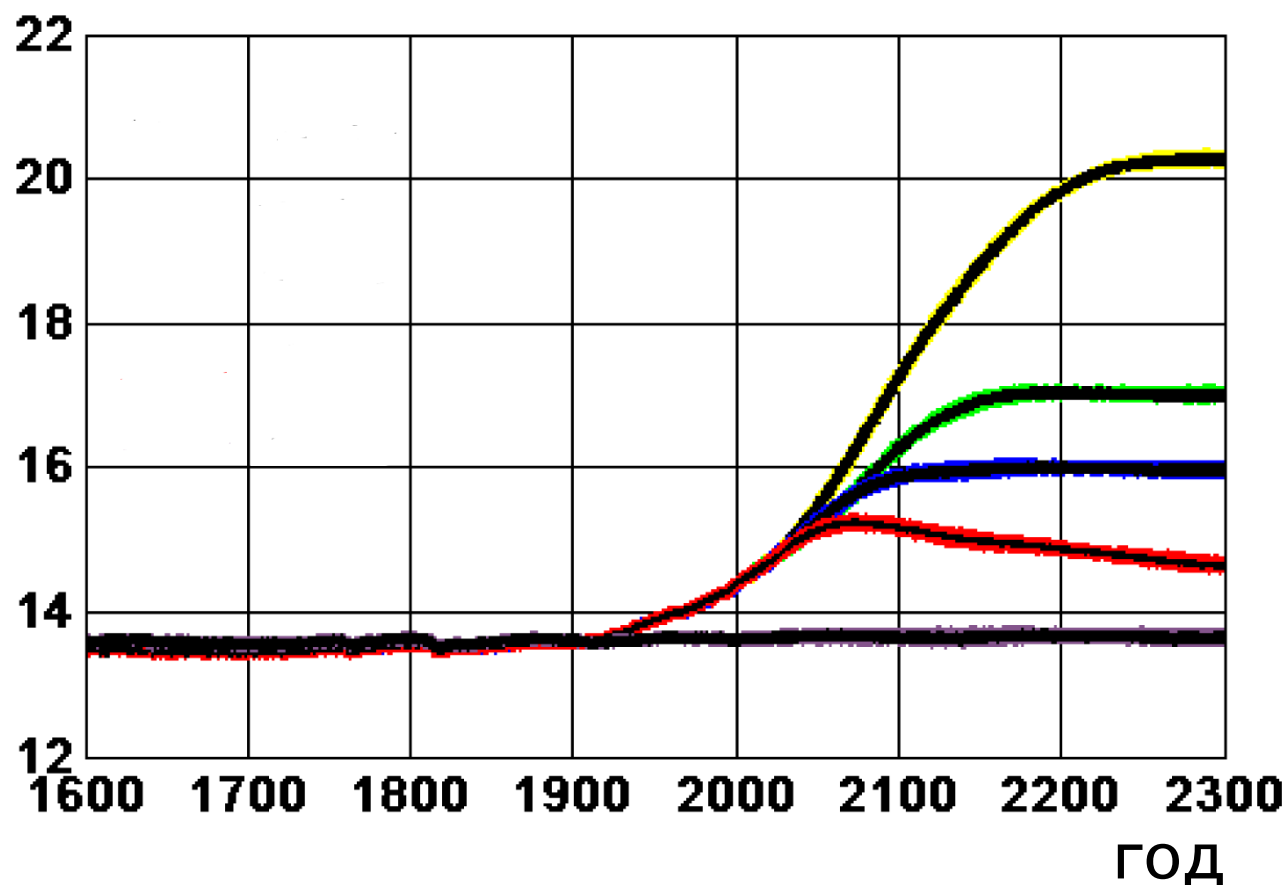
- CMIP5
(включая стандартный протокол CMIP5)
- [Steinhilber et al., 2009]
- [Krivova et al., 2009]

Сценарии для S экстраполяцией на XXI–XXIII века в предположении циклических вариаций S (авторегрессионный процесс).

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Изменение глобальной приземной температуры в КМ ИФА РАН [Mokhov et al., 2012]

$\Delta T_{a,g}$ [K]



- RCP 2.6
- RCP 4.5
- RCP 6.0
- RCP 8.5
- без антропогенного воздействия

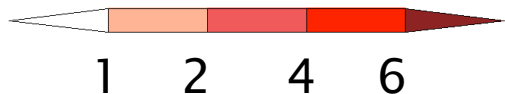
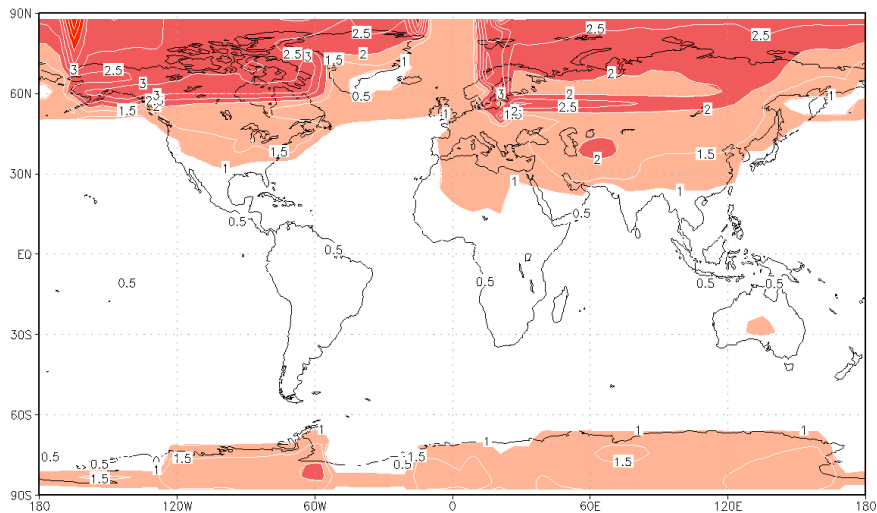
линии: ансамблевое среднее
штриховка: внутриансамблевое СКО

1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

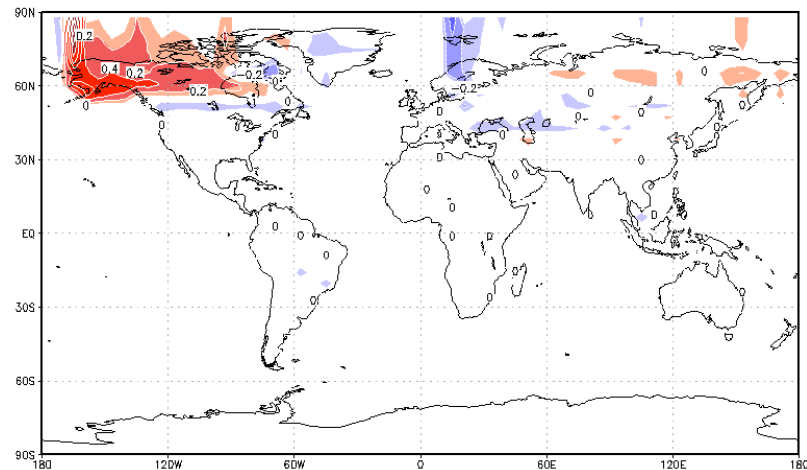
Изменение приземной температуры в КМ ИФА РАН при сценарии RCP 2.6 от 1961–1990 гг. к 2090–2100 гг. [Mokhov et al., 2012]

с наибольшими положительными аномалиями T

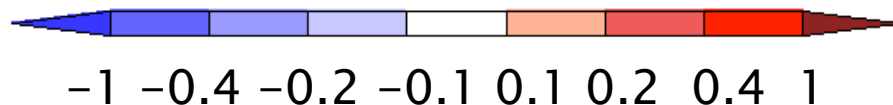
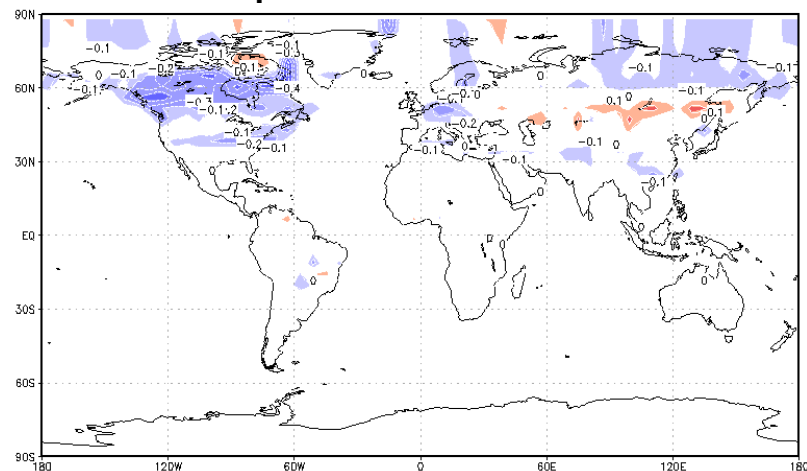
среднее по всем сценариям для S



В локализованных регионах аномалии достигают $\sim 1/5$ от среднего



с наибольшими отрицательными аномалиями T

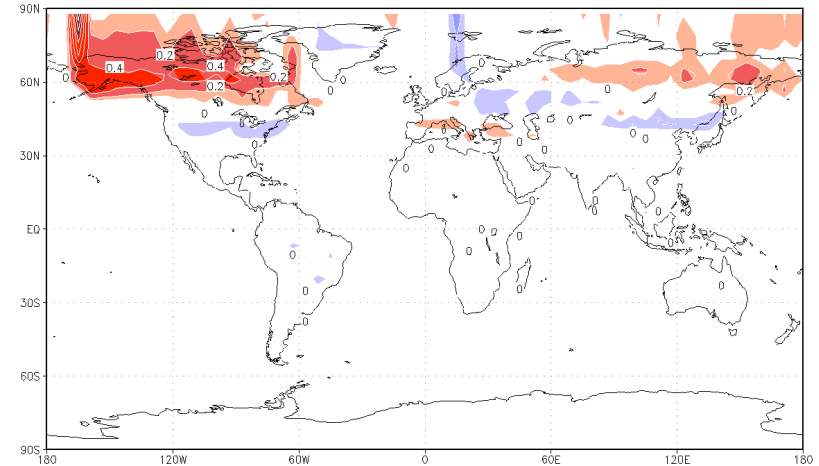
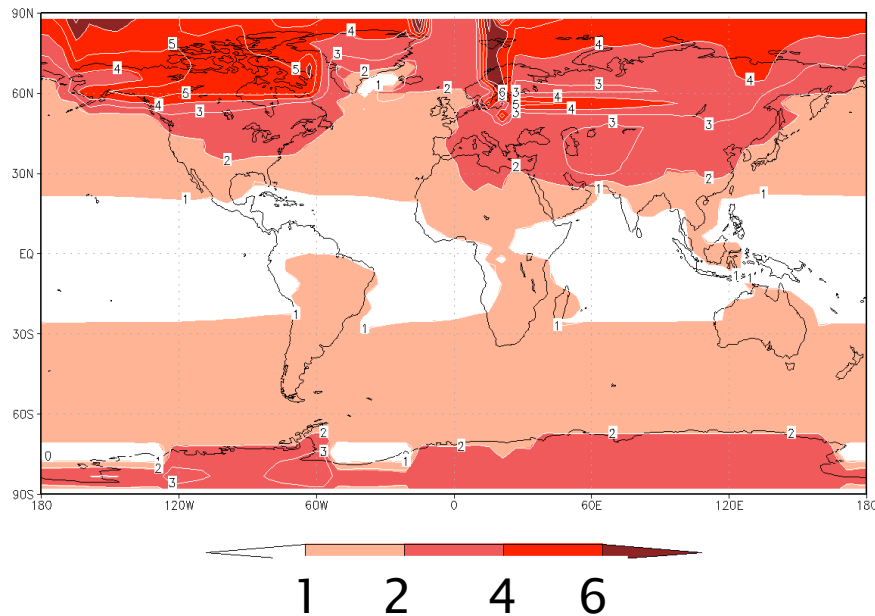


1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

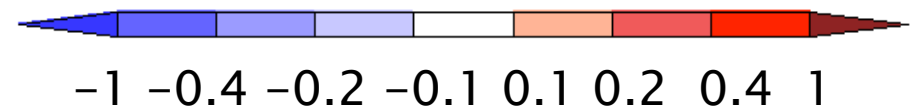
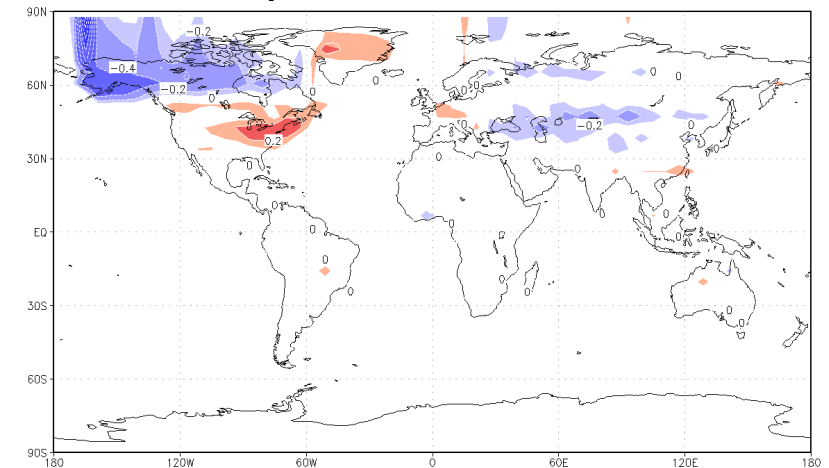
Изменение приземной температуры в КМ ИФА РАН при сценарии RCP 4.5 от 1961–1990 гг. к 2090–2100 гг. [Mokhov et al., 2012]

с наибольшими положительными аномалиями T

среднее по всем сценариям для S



с наибольшими отрицательными аномалиями T



Везде аномалии $\leq 10\%$ от среднего.

Ещё меньше вклад солнечной активности при сценариях RCP 6.0 и RCP 8.5, а также в XXII–XXIII вв.

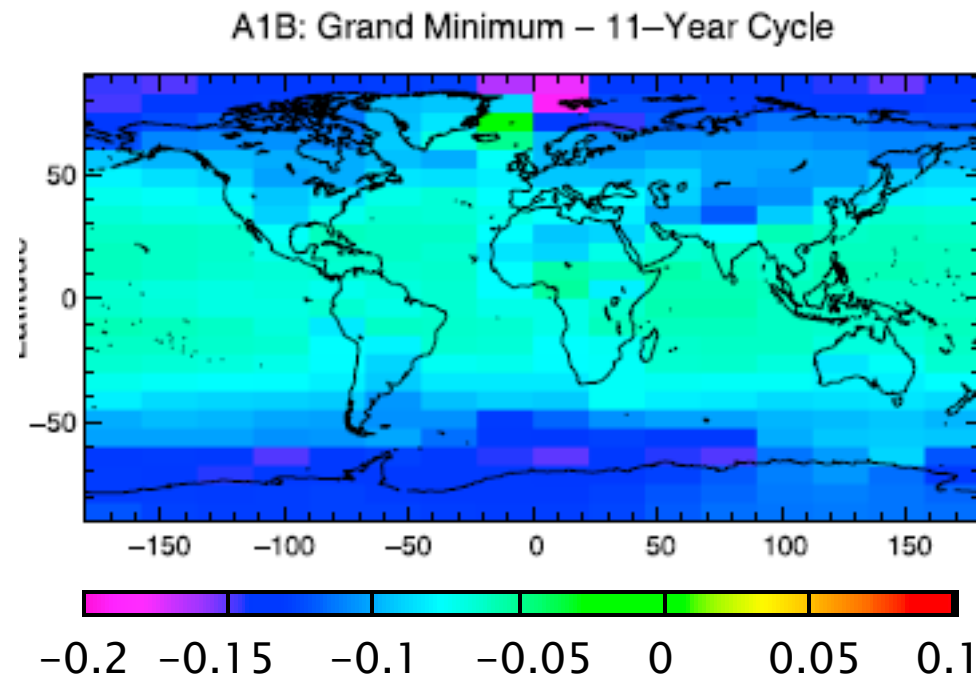
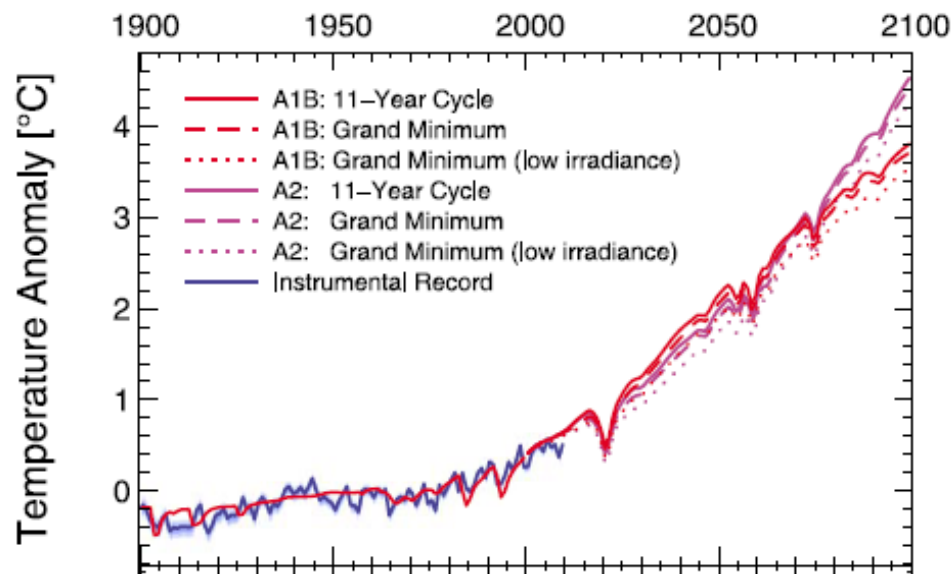
1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Изменение приземной температуры в Climber-3 α [Feulner, Rahmstorf, 2010]

Сценарии антропогенного воздействия: SRES A1B, SRES A2

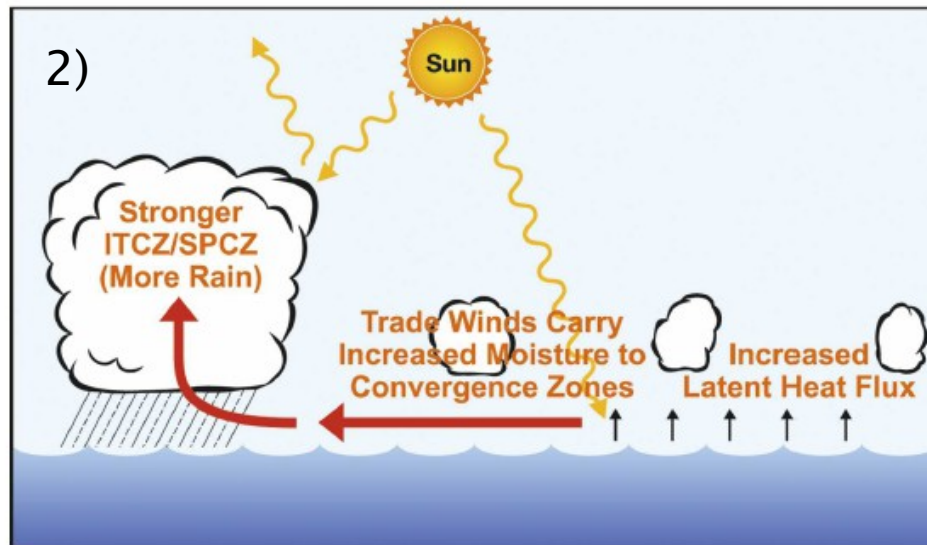
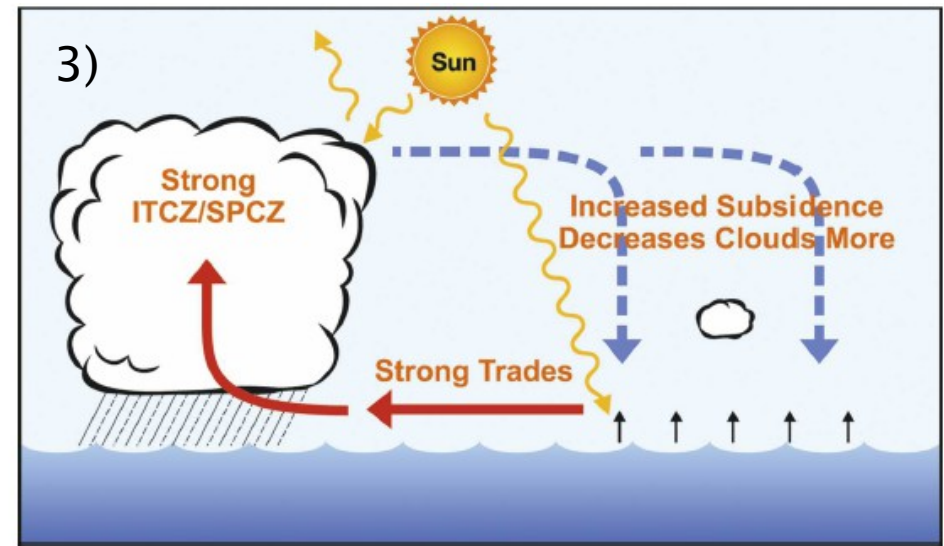
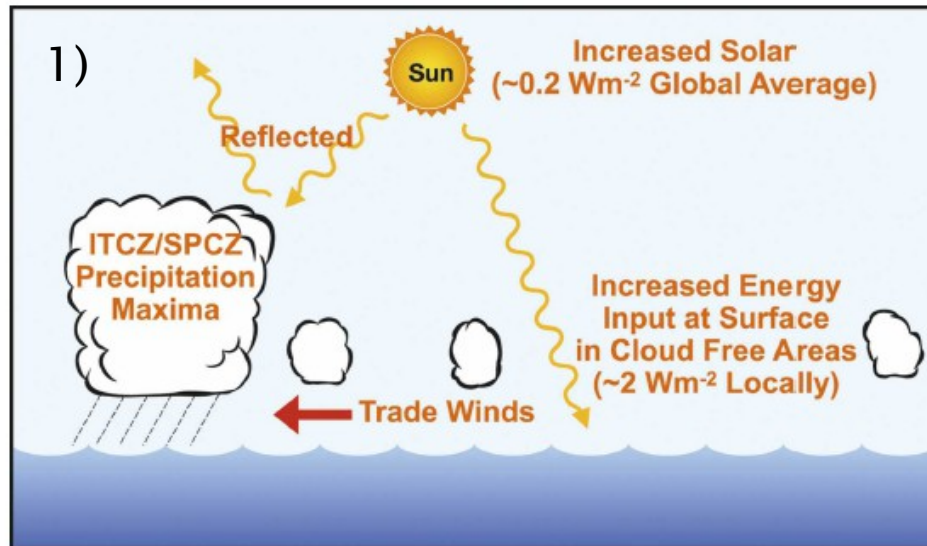
Сценарии изменения S:

- продолжение последнего 11-летнего цикла;
- «Maunder minimum»: в 2025 г. S уменьшается на 0.08%, затем не меняется;
- «Maunder minimum (low irradiance)»: в 2025 г. S уменьшается на 0.25%, а затем не меняется

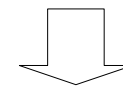


1. Прямой механизм: общее изменение инсоляции со временем

Механизм влияния в тропиках [Cubasch et al., 1997; Meehl et al., 2008]



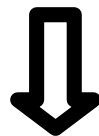
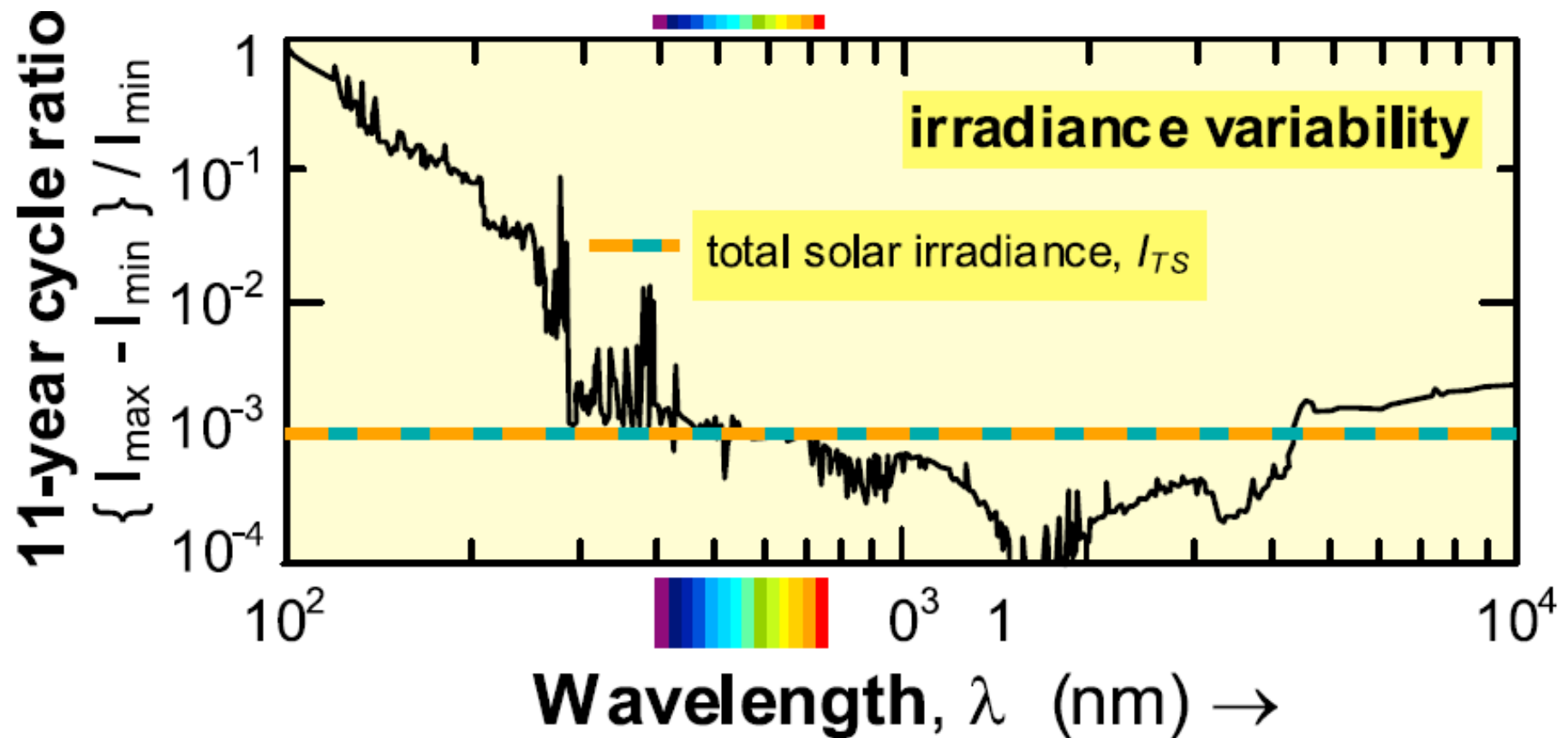
Приток тепла к атмосфере от океана:
0.5 Вт/м² [White et al., 2003]
Это намного больше вариаций
инсоляции в 11-летнем цикле
(0.15–0.20 Вт/м²)



Возможно влияние стратосферы
("downward control principle"
[Hayes et al., 1991])

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

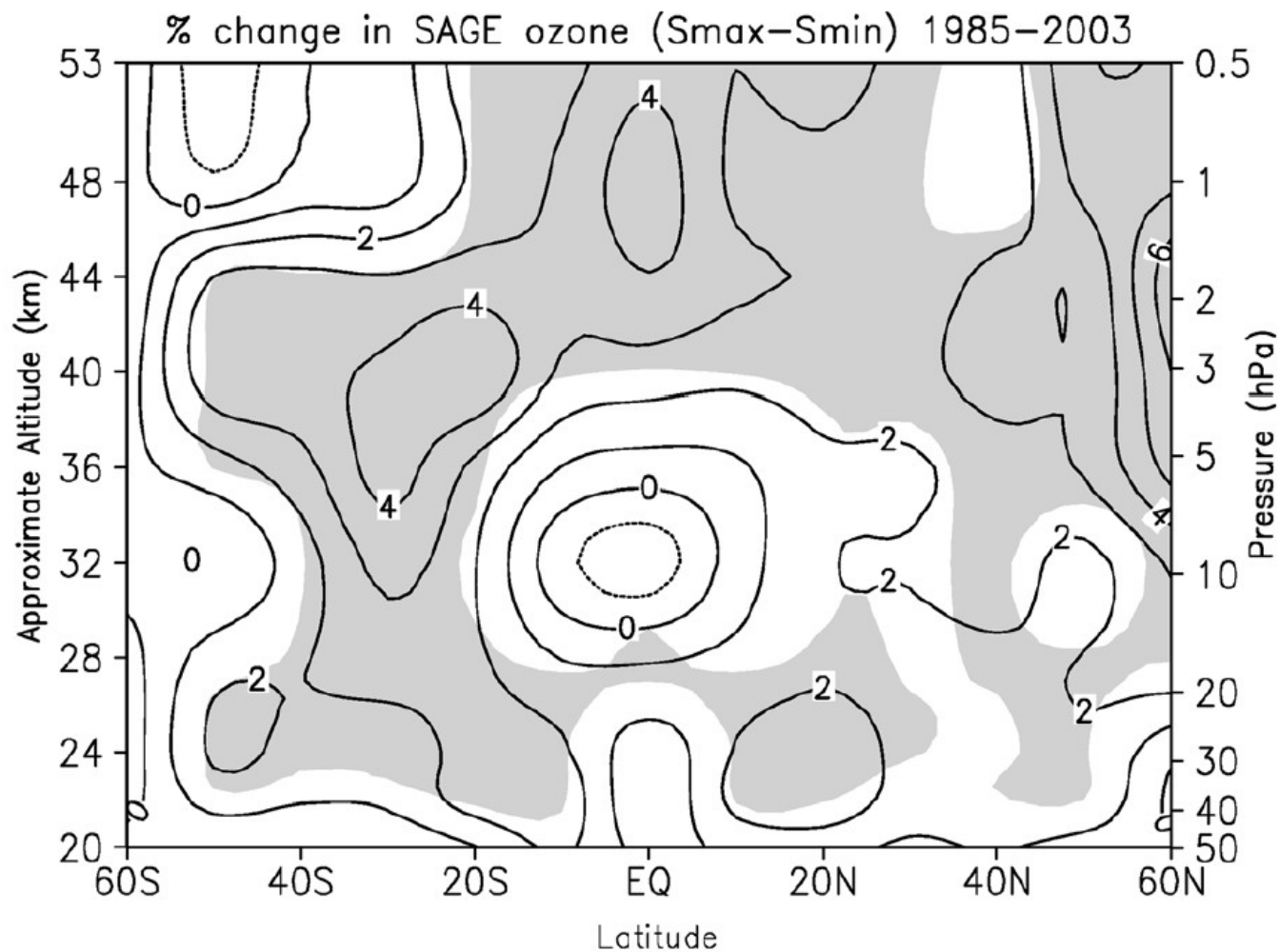
Изменение спектра солнечного излучения в 11-летнем цикле



УФ-излучение меняется на 0.7 %

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

Изменение содержания O_3 в 11-летнем цикле [Soukharev, Hood, 2006]

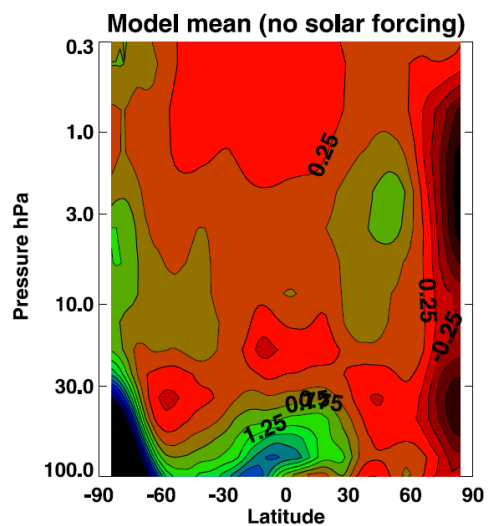
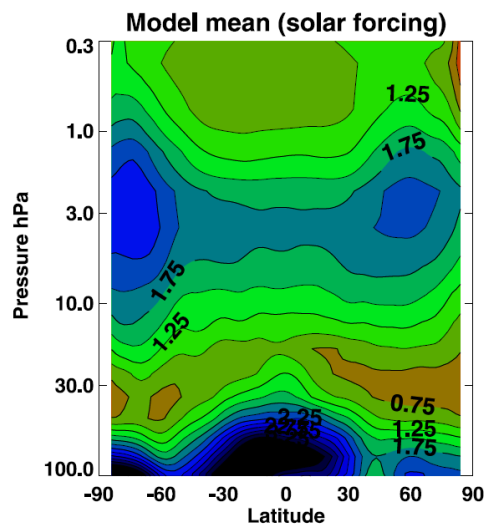


штриховка:
результаты значимы
на уровне 5%

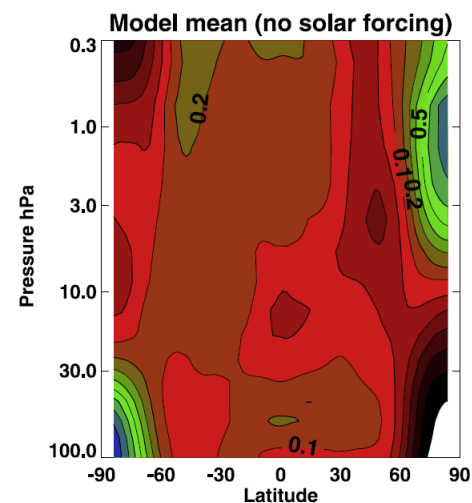
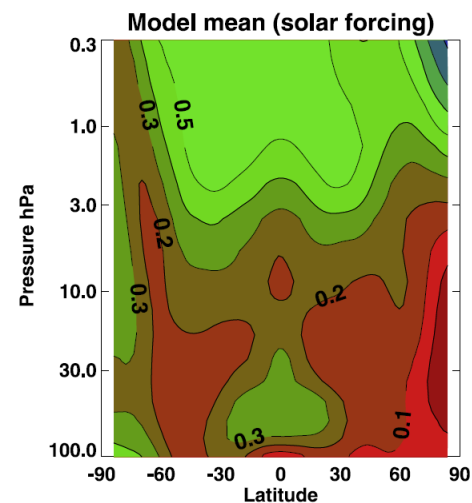
2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

Модельный отклик $[O_3]$ на 11-летний цикл (проект CCMVal) [Austin et al., 2008]

$[O_3]$ [% на 100 ед. F10.7]



температура [K на 100 ед. F10.7]

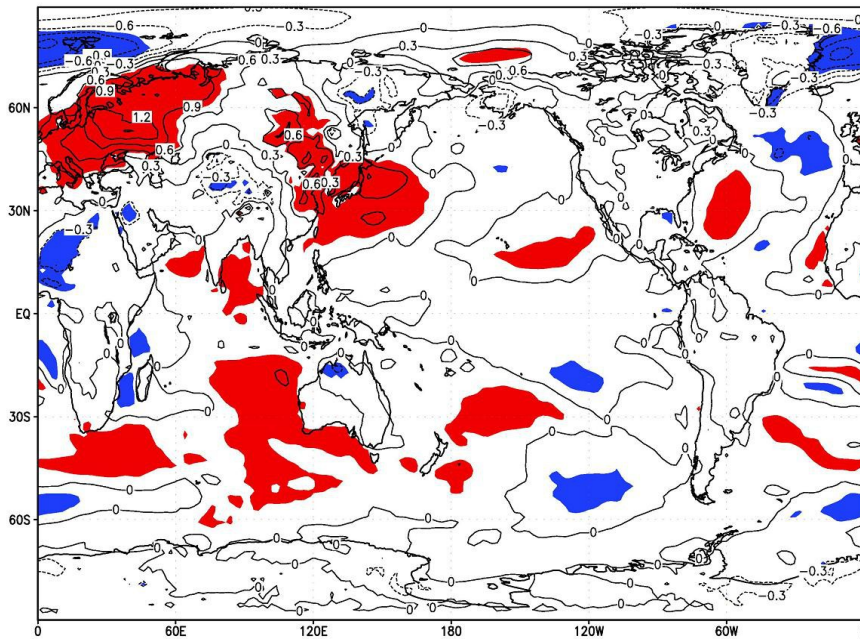


Отклик модели INMCM4 (ИВМ РАН) на 11-летний солнечный цикл [Е.М. Володин, личное сообщение]

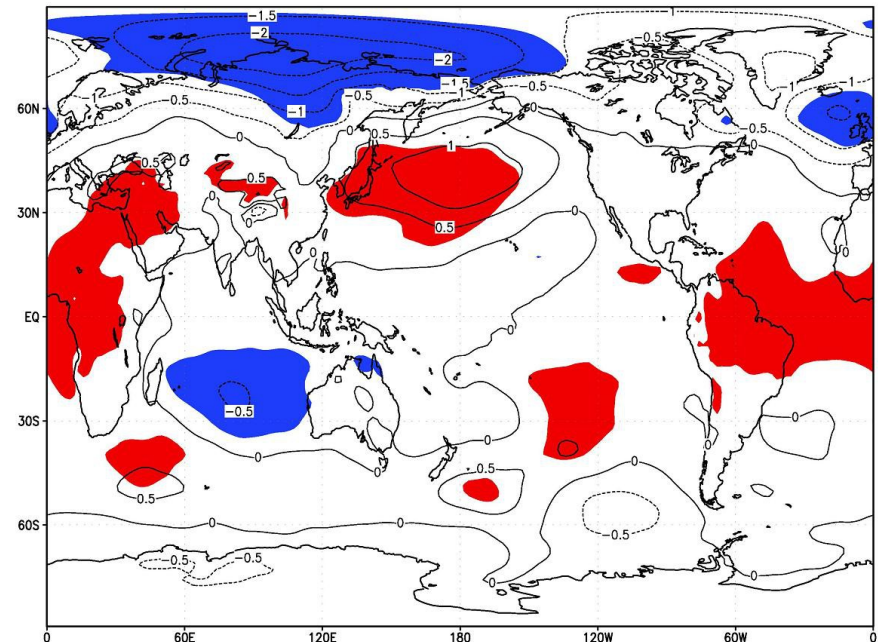
- эксперимент 'historic' (1850–2005 гг.) проекта CMIP5;
- наряду с другими внешними воздействиями были заданы
 - а) изменения S и спектрального состава излучения Солнца;
 - б) изменения содержания O_3 .

Разности $S_{\max} - S_{\min}$, ноябрь–апрель

приземная температура



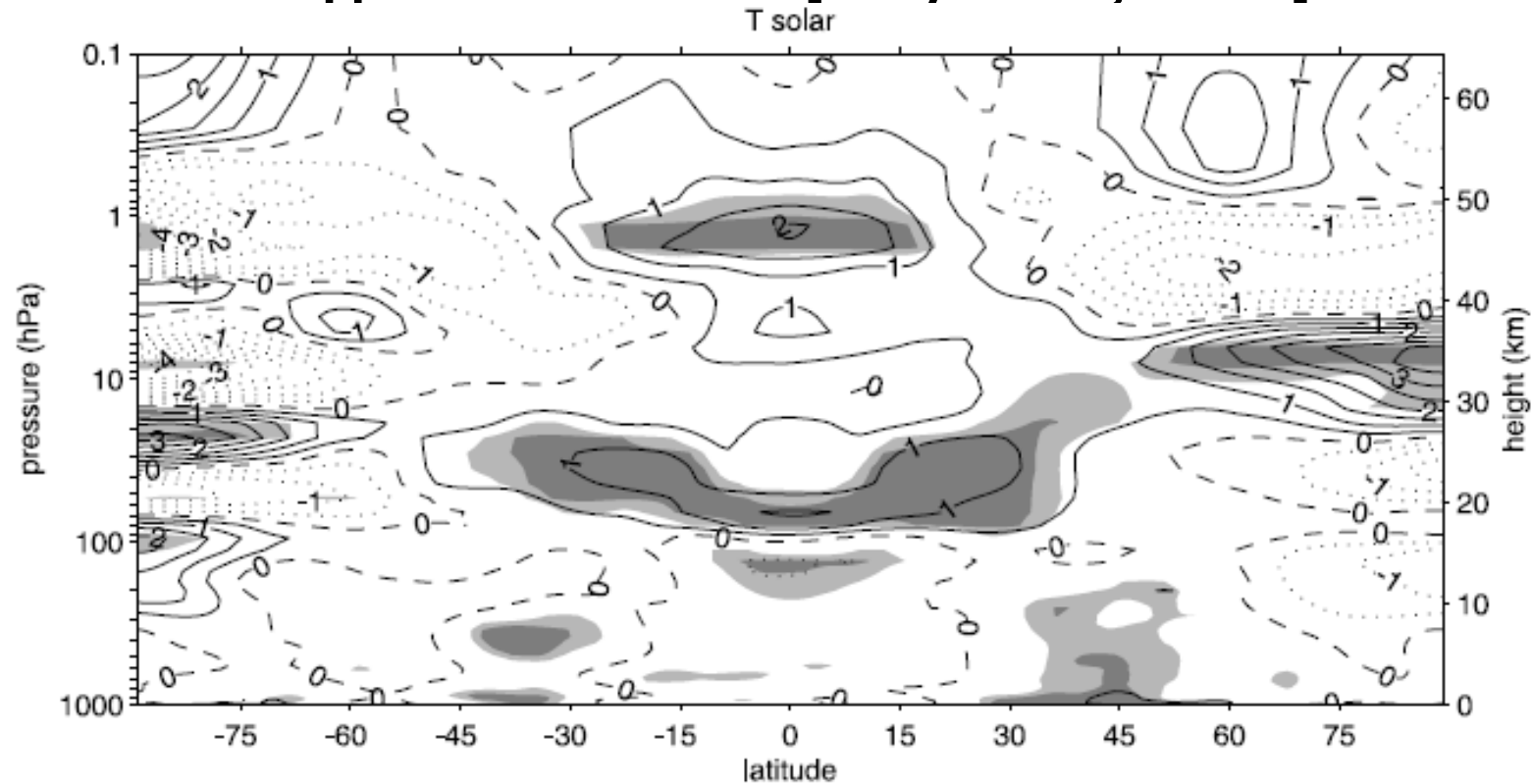
давление на уровне моря



закрашены области, где отклик значим на $\geq 99\%$

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

Отклик температуры стратосферы на 11-летний цикл ($S_{\max} - S_{\min}$) по данным ERA-40 [Gray et al., 2010]



Структура отклика существенно отличается от отклика на парниковое воздействие (охлаждения на всех широтах). Это, в принципе, позволяет выделить вклад парникового и солнечного сигналов в наблюдаемых изменениях температуры стратосферы. Однако, следует иметь в виду особенность отклика температуры стратосферы на 11-летний цикл по сравнению с подобным равновесным (установившимся) откликом на изменение солнечной постоянной без учёта влияния солнечной активности на $[O_3]$, когда температура увеличивается во всей стратосфере

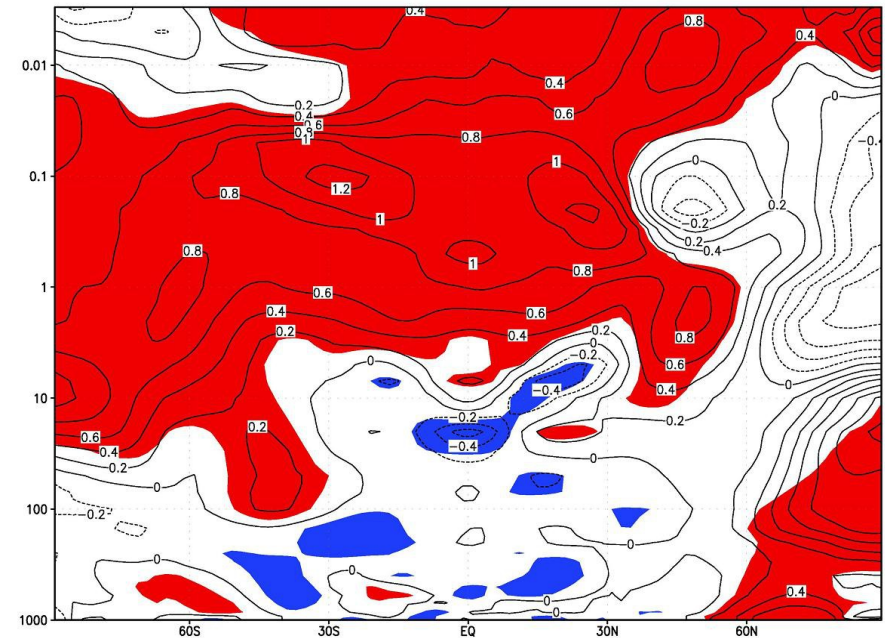
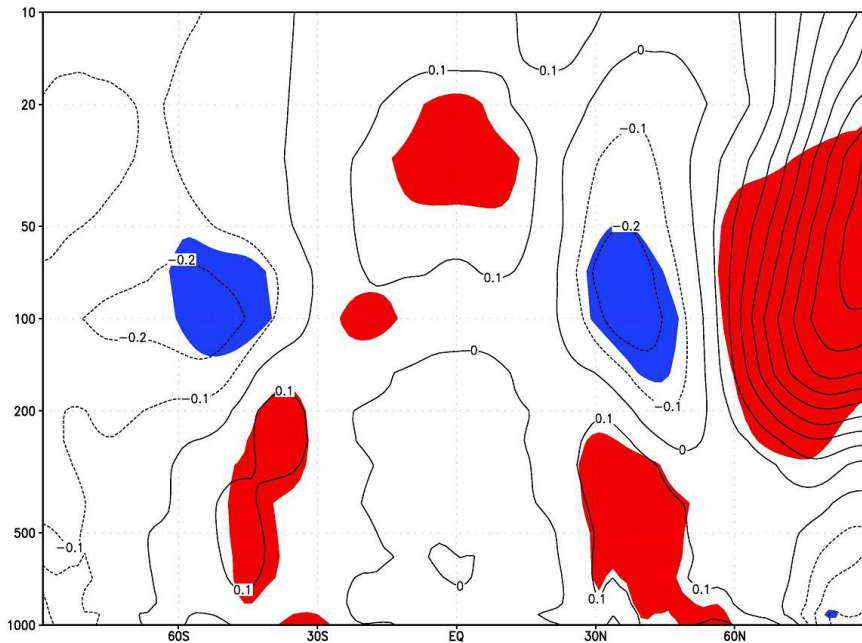
Отклик модели INMCM4 (ИВМ РАН) на 11-летний солнечный цикл [Е.М. Володин, личное сообщение]

- эксперимент 'historic' (1850–2005 гг.) проекта CMIP5;
- наряду с другими внешними воздействиями были заданы
 - а) изменения S и спектрального состава излучения Солнца;
 - б) изменения содержания O_3 .

Температура, разность $S_{\max} - S_{\min}$, ноябрь–апрель

верхняя граница атмосферы на 10 гПа

верхняя граница атмосферы на 0.003 гПа

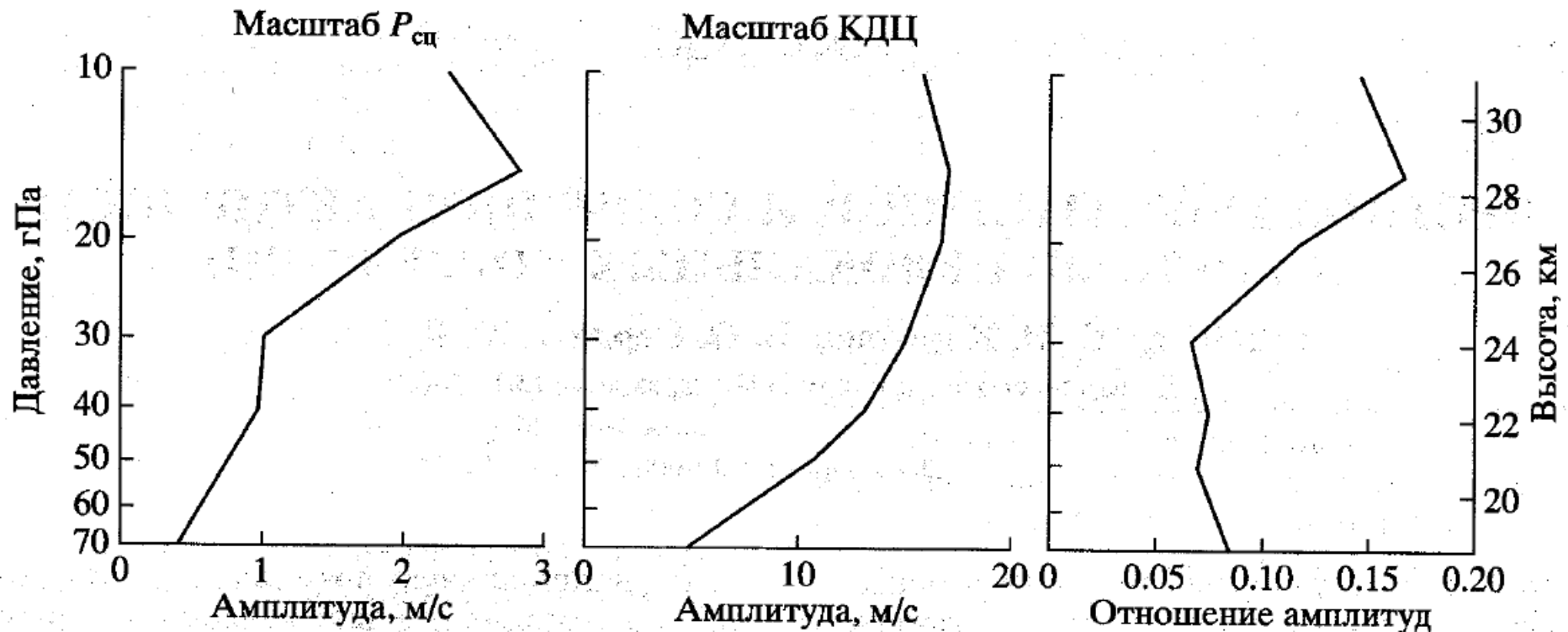


закрашены области, где отклик значим на $\geq 99\%$

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

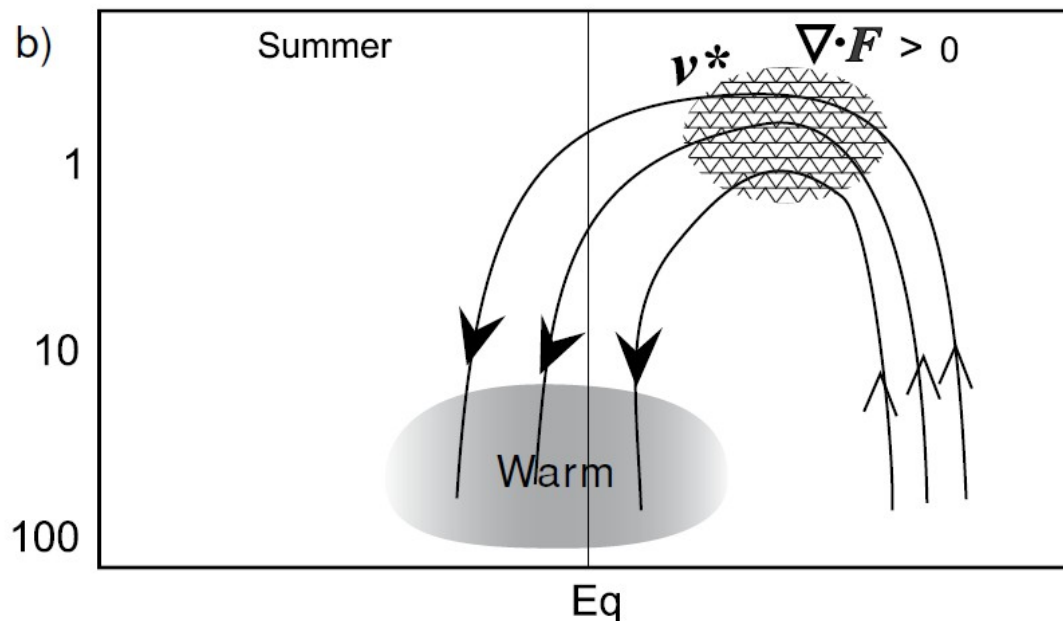
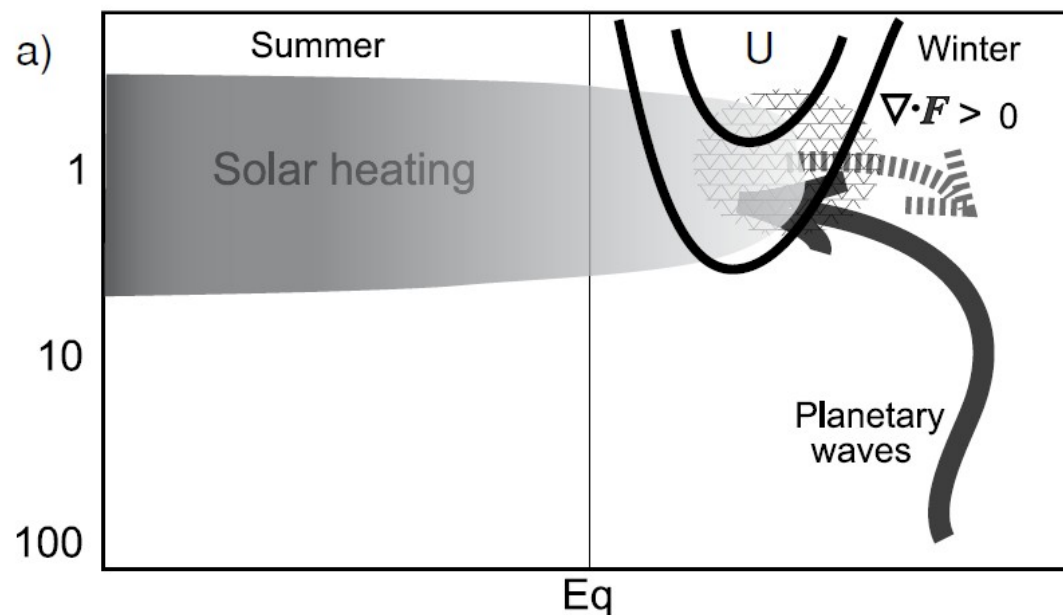
Влияние 11-летнего СЦ на КДЦ зонального ветра нижней приэкваториальной стратосферы [Груздев, Безверхний, 2007]

вейвлет-компоненты зонального ветра в приэкваториальной стратосфере



2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

Влияние 11-летнего цикла на распространение стационарных планетарных волн в стратосфере [Kodera, Kuroda, 2002]



В годы S_{\max} зимний полярный вихрь и циркуляция Брюэра–Добсона ослабевают, полярная стратосфера холоднее обычной, тропическая – теплее обычной. Это приводит к росту содержания озона в стратосфере тропиков и, следовательно, дополнительному нагреву стратосферы.

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

Зависимость влияния солнечной активности на циркуляцию стратосферы в зависимости от фазы КДЦ в приэкваториальной нижней стратосфере

КДЦ: изменение направления зонального ветра в приэкваториальной нижней стратосфере каждые 26–30 мес. \Rightarrow приводят к изменению широтного положения критической линии для стационарных планетарных волн $\bar{u} = 0$ [Holton, Tan, 1980].

[Labitzke, 2000]:

- В годы S_{\max} / восточной фазы КДЦ ослабевает циркуляция Брюэра–Добсона, т.е. апвеллинг в нижней стратосфере тропиков и адиабатической выхолаживание воздушных масс \Rightarrow сигнал наиболее значим в тропиках
- В годы S_{\max} / западной фазы КДЦ усиливается циркуляция Брюэра–Добсона, т.е. даунвеллинг в нижней стратосфере высоких широт и адиабатической выхолаживание воздушных масс \Rightarrow сигнал наиболее значим в высоких широтах



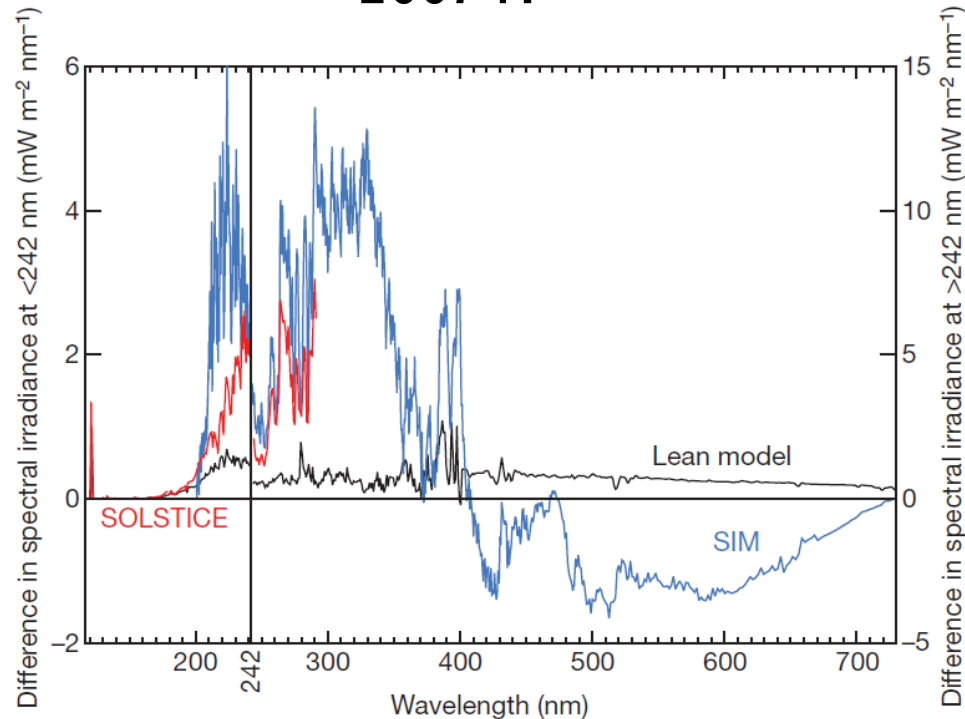
Согласуется с механизмом [Kodera, 2000]

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

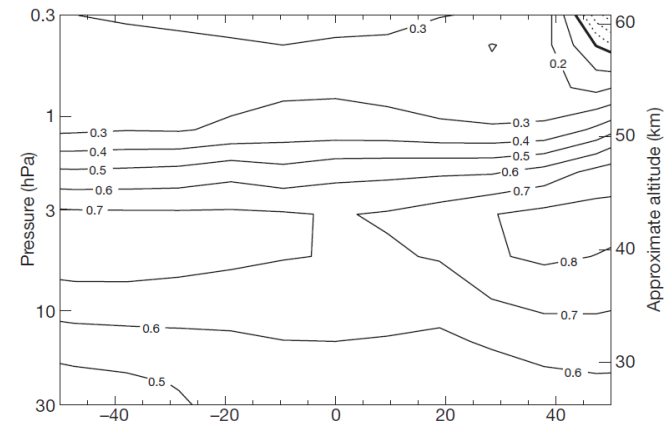
Особенности механизма для СЦ 23 [Haigh et al., 2010]

Отклик $[O_3]$ на изменение УФ-радиации от 2004 г. к 2007 г. в 2D радиационно-фотохимической модели

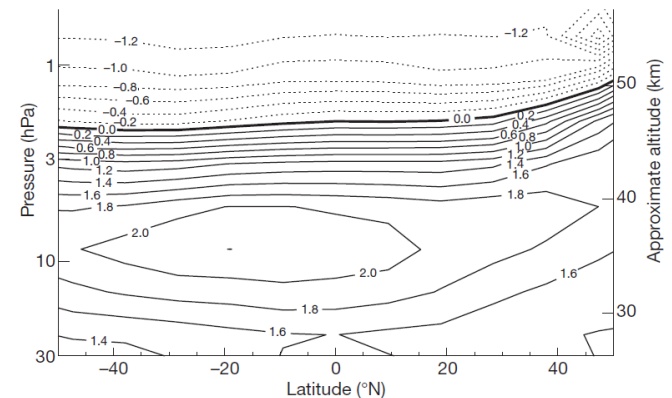
Изменение спектрального состава излучения от 2004 г. к 2007 г.



Lean model



SIM/SOLSTICE data (согласуется с наблюдениями)



Нетипичность СЦ 23 затрудняет вывод о том, насколько типичен такой отклик $[O_3]$ для других солнечных циклов

2. Косвенные механизмы, связанные с РВВ озона

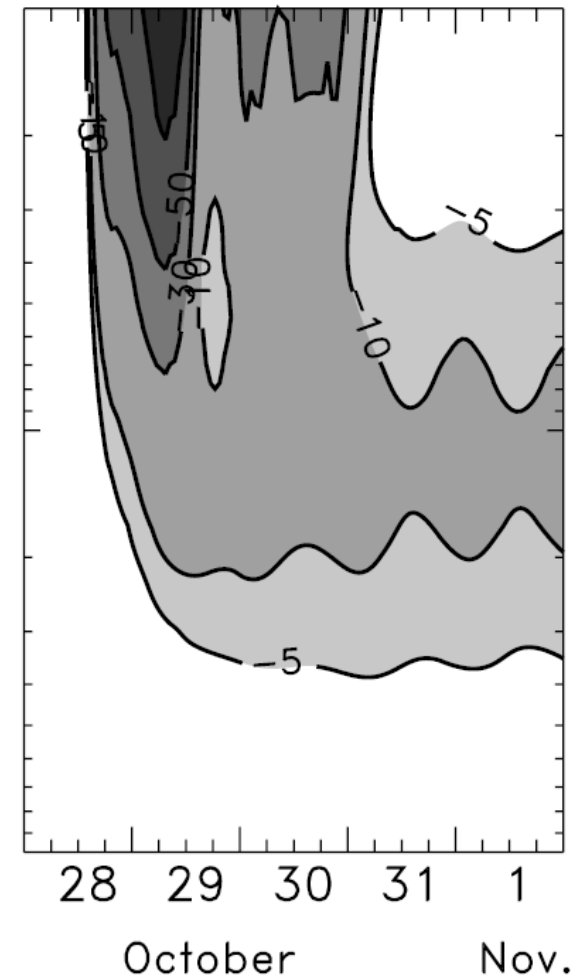
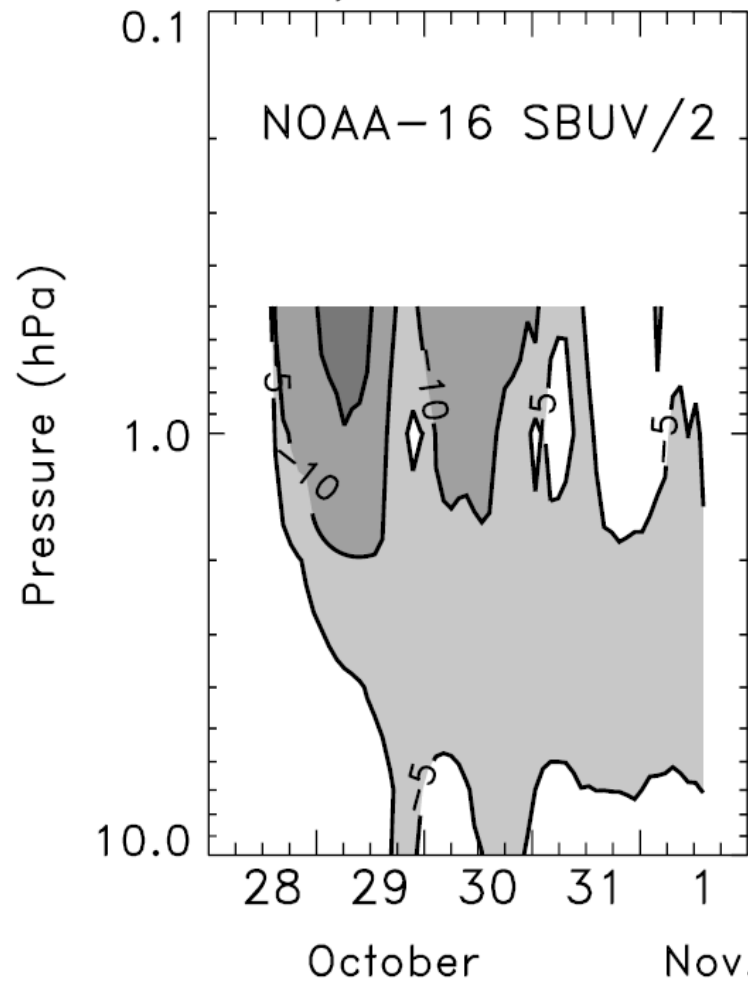
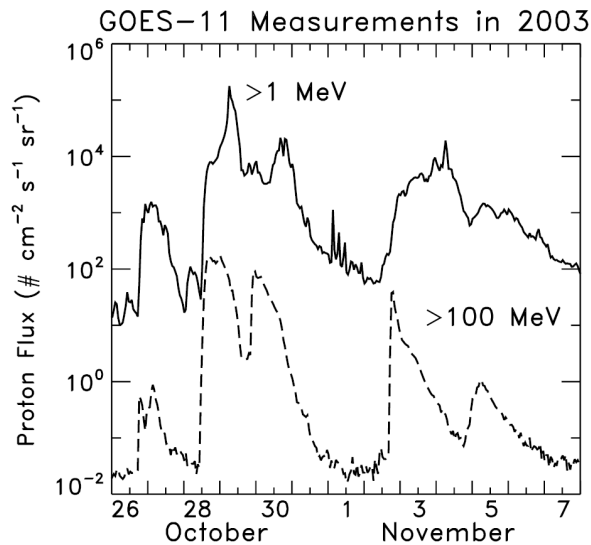
Отклик $[O_3]$ на протонные вспышки [Jackman et al., 2006]

Отклик $[O_3]$ в полярной области

измерения
NOAA 16 SBUV/2

расчёты с
моделью GSFC 2D

ПОТОК ПРОТОНОВ В
ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ



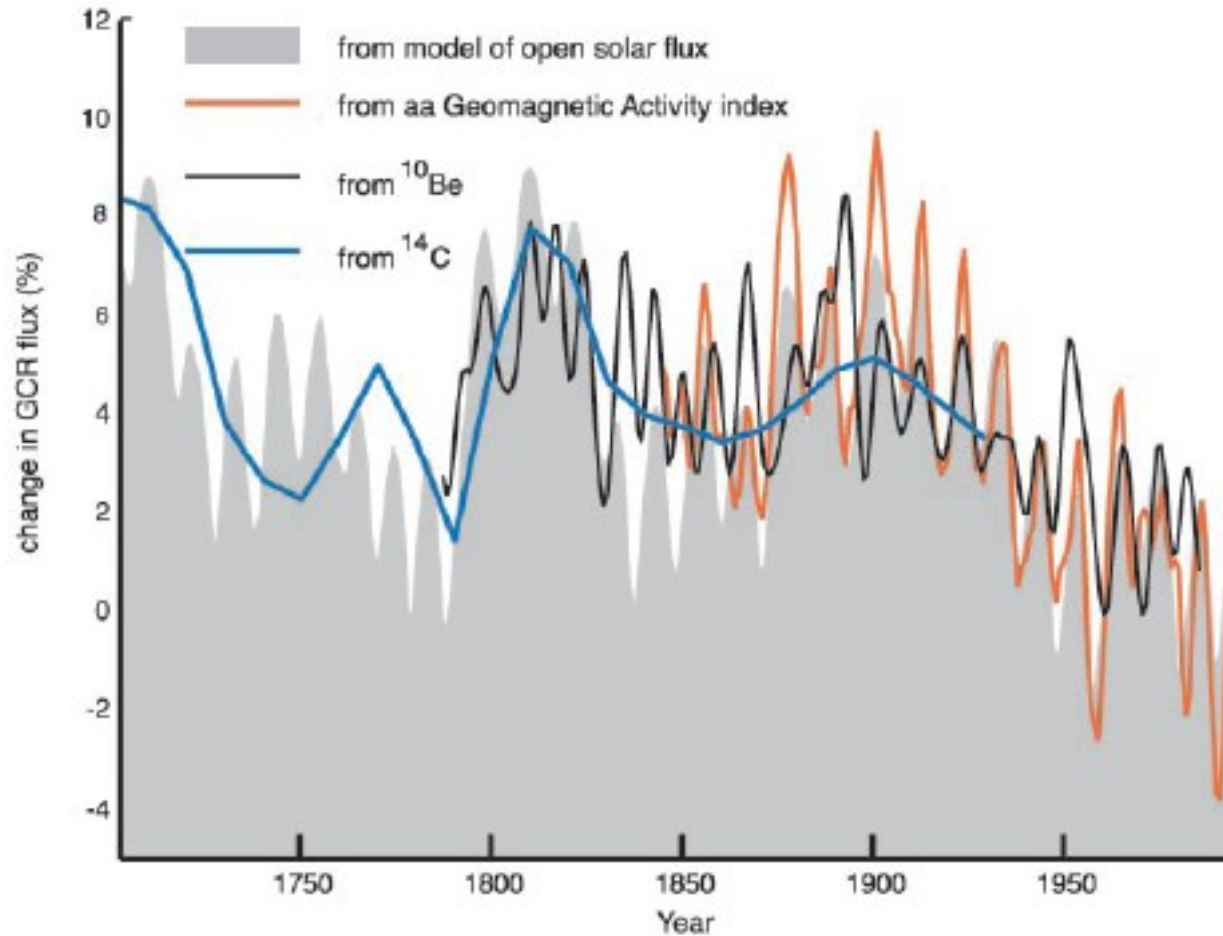
Механизм влияния протонных вспышек на $[O_3]$ в полярной области зимой [Krivolutsky et al., 2005; Jackman et al., 2006]

В периоды протонных вспышек интенсификация формирования HO_x и NO_y :
– влияние HO_x может приводить к уменьшению $[O_3]$ в 2 раза и длиться несколько суток;
– влияние NO_y может приводить к уменьшению $[O_3]$ на 10% и длиться несколько месяцев.

В области зимнего полярного вихря эти вещества могут опускаться также в нижнюю стратосферу, приводя к разрушению озона в области его максимума по высоте (статистически значимая корреляция $[O_3]$ с фазой геомагнитной активностью отмечается, по крайней мере, весной в полярных широтах Южного полушария).

Однако этот механизм ограничен областью зимнего полярного вихря, занимающего относительно небольшую площадь Земли и существующего при малой инсоляции. \Rightarrow Вклад этого механизма в общее климатическое РВВ, по-видимому, мал.

Изменение интенсивности потока галактических [Carslaw et al., 2002]

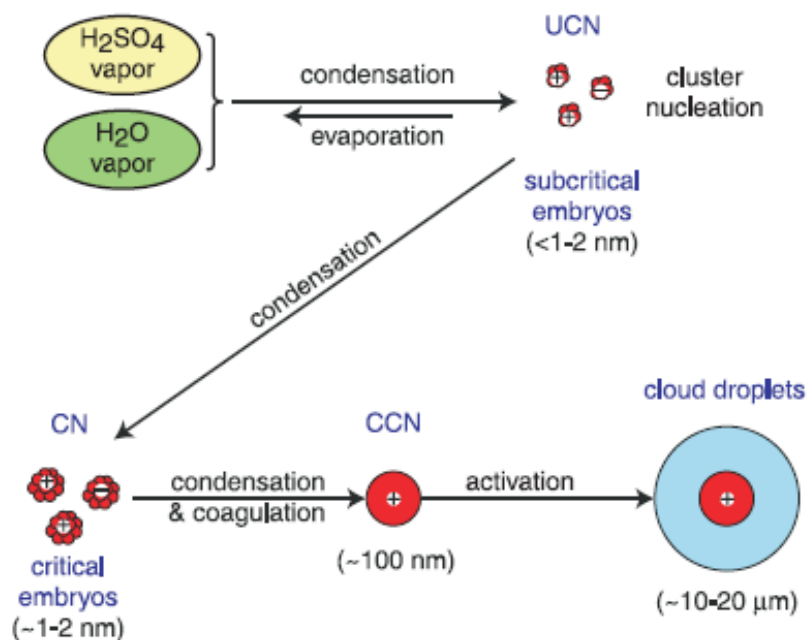


Модулируется солнечной активностью

3. Косвенные механизмы, связанные с характеристиками облачности

Механизмы влияния галактических лучей на характеристики облачности [Carslaw et al., 2002]

Внеоблачный ион-аэрозольный механизм

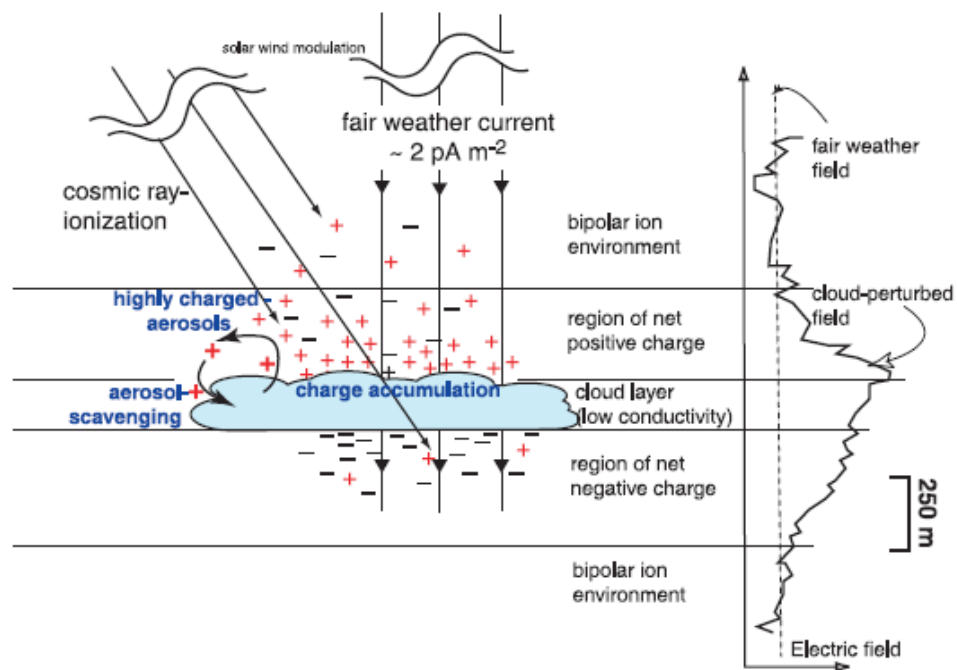


Заряд на частицах аэрозоля $\sim e$



Мало чувствителен к интенсивности потока галактических лучей

Околооблачный ион-аэрозольный механизм



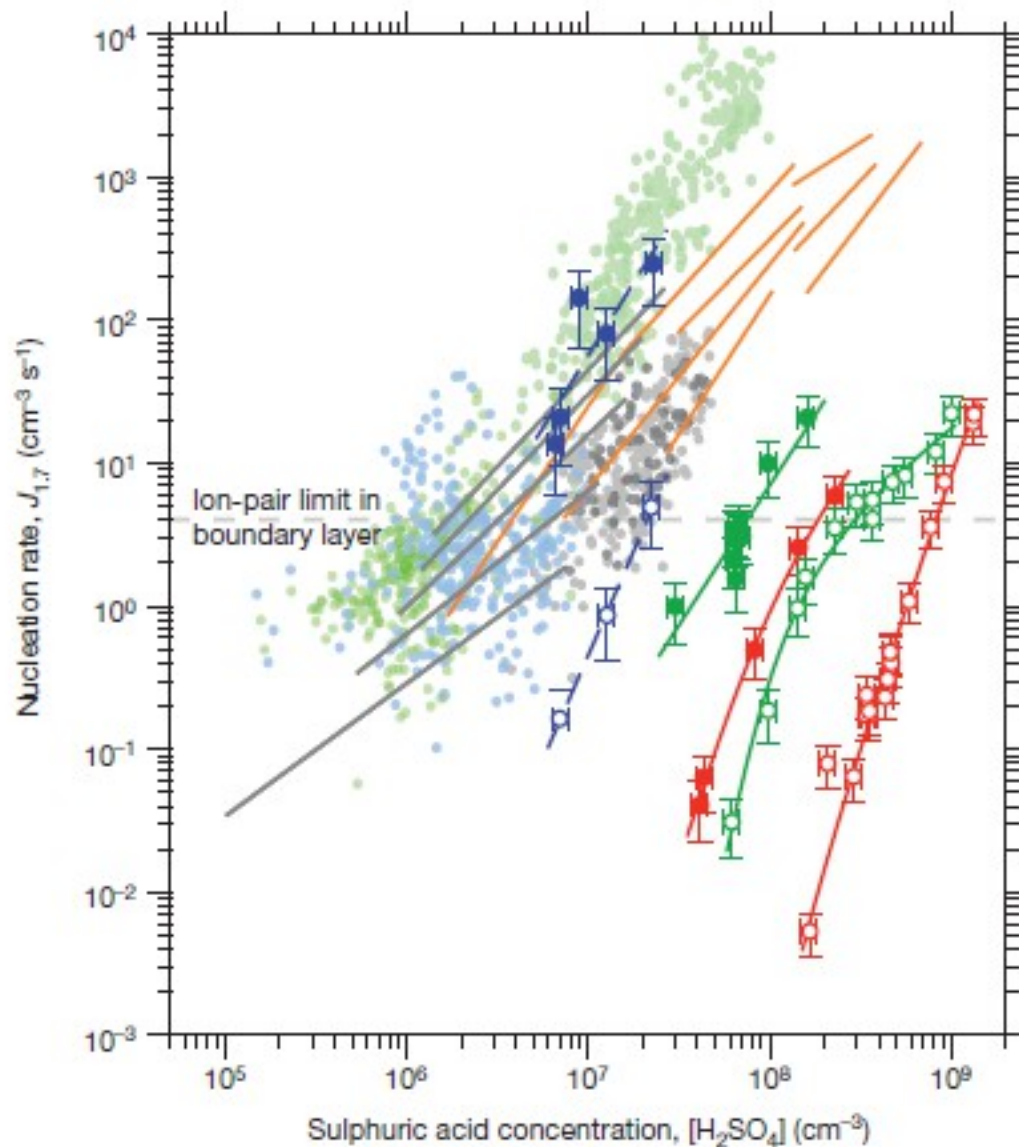
Заряд на частицах аэрозоля $\sim 10^2 e$



Чувствителен к интенсивности потока галактических лучей
Изучен плохо

3. Косвенные механизмы, связанные с характеристиками облачности

Зависимость интенсивности нуклеации от интенсивности ионизации (эксперимент CLOUD; CERN [Kirkby et al., 2011])

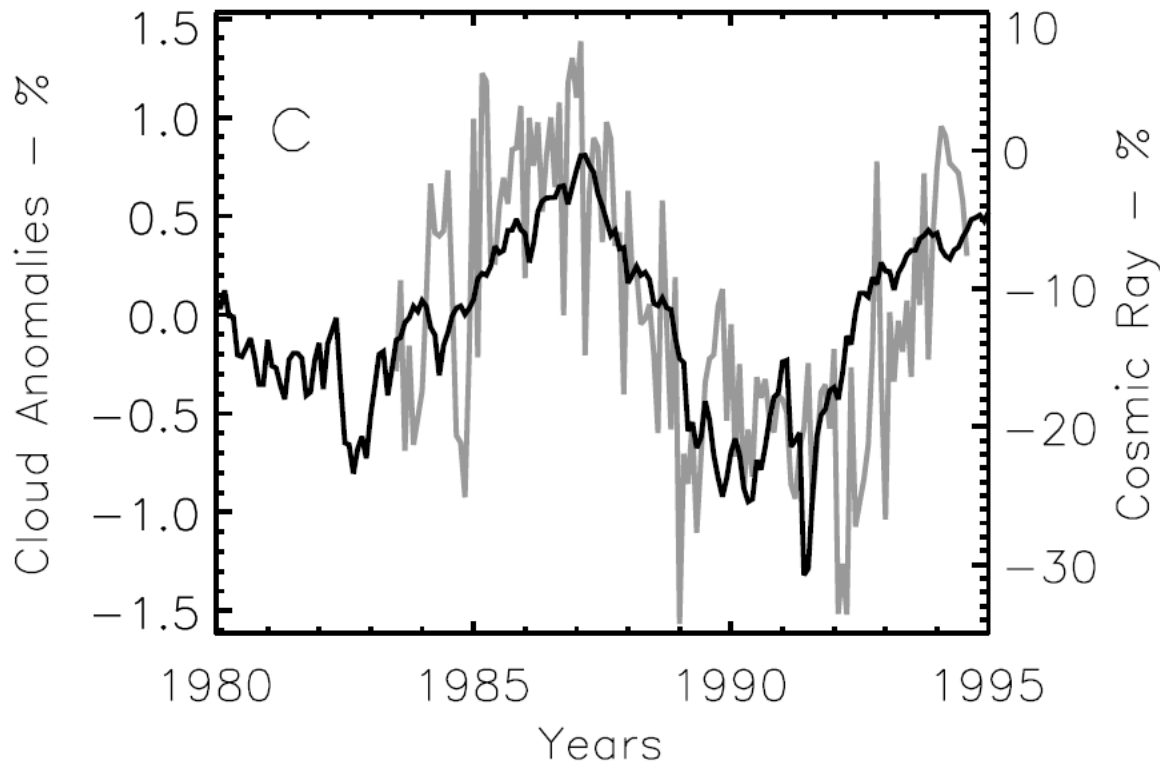


■ $T=248 \text{ K}$
■ $T=278 \text{ K}$
■ $T=292 \text{ K}$

разные символы –
разные q_{CH_3}

бледные символы и
линии — другие
данные

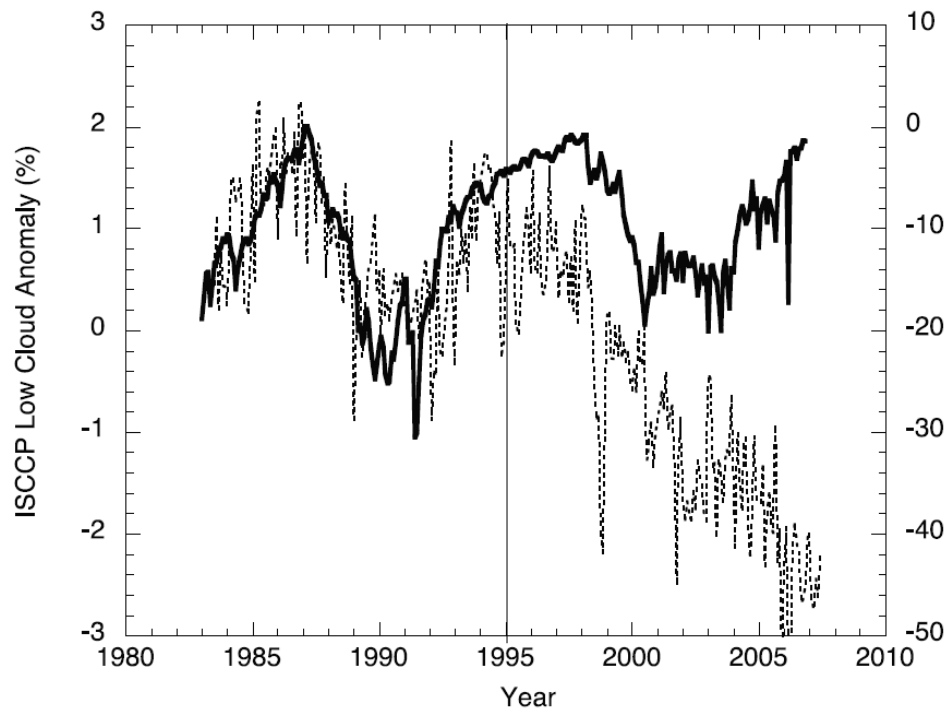
Влияние галактических лучей на характеристики облачности [Marsh, Svensmark, 2000] (1)



- поток галактических частиц (Климакс, США)
 - количество облаков нижнего яруса (с верхней границей ниже высоты 680 гПа) по данным ISCCP D2
- обе величины сглажены 12-месячным скользящим осреднением

Влияние галактических лучей на характеристики облачности [Marsh, Svensmark, 2000] (2)

по результатам [Gray et al., 2010]

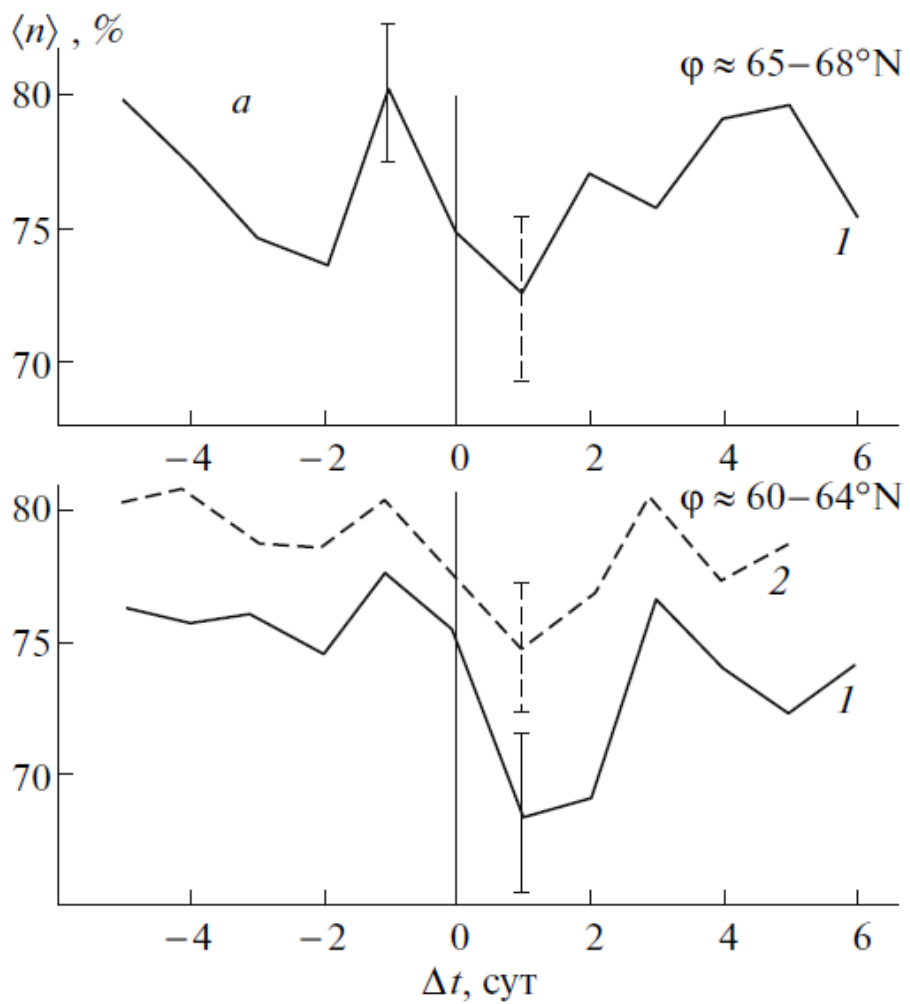


- поток галактических частиц (Климакс, США)
 - · количество облаков нижнего яруса (с верхней границей ниже высоты 680 гПа) по данным ISCCP D2
- обе величины сглажены 12-месячным скользящим осреднением

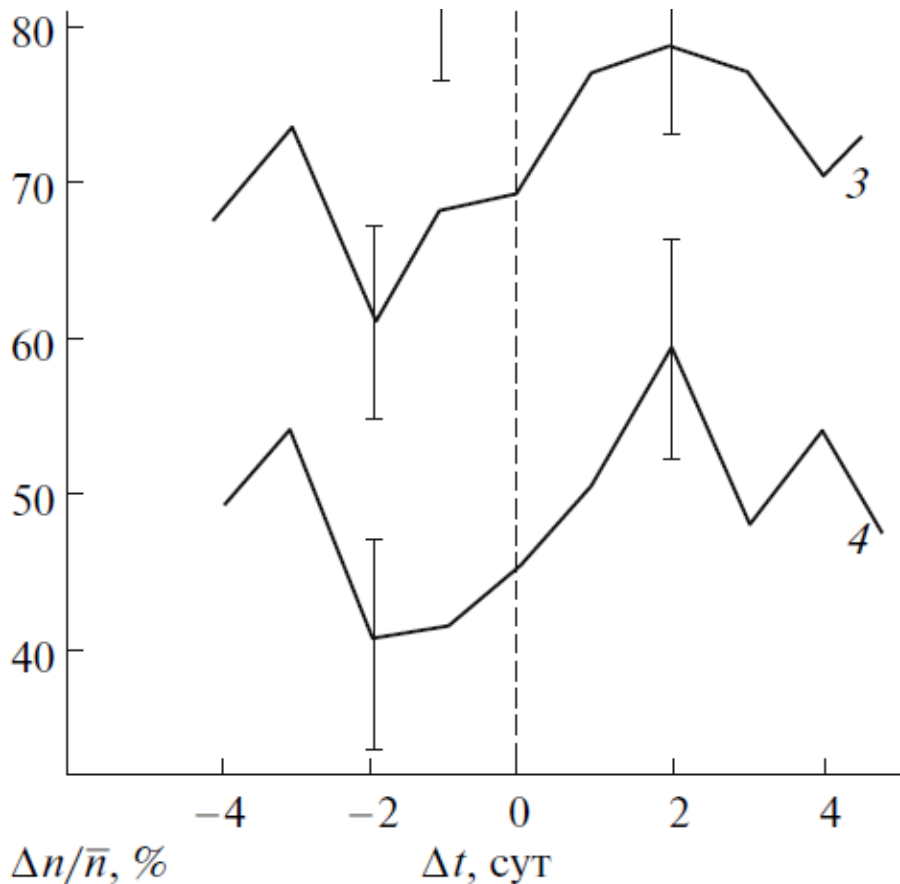
Возможно влияние вулканических извержений, изменяющих содержание аэрозоля в стратосфере и её электрическую проводимость [Tinsley, 2000].

Влияние галактических лучей на характеристики облачности [Распопов, Веретененко, 2009] (первые работы — 1995 г.)

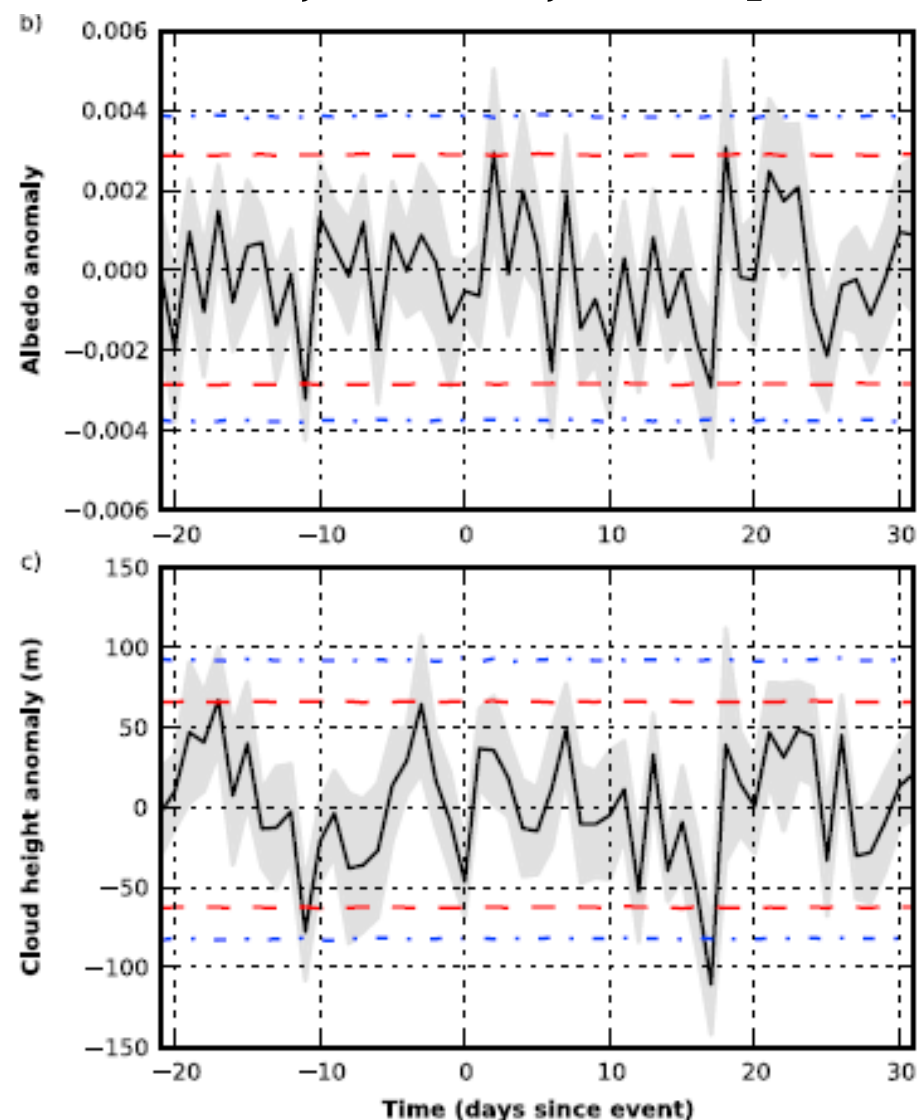
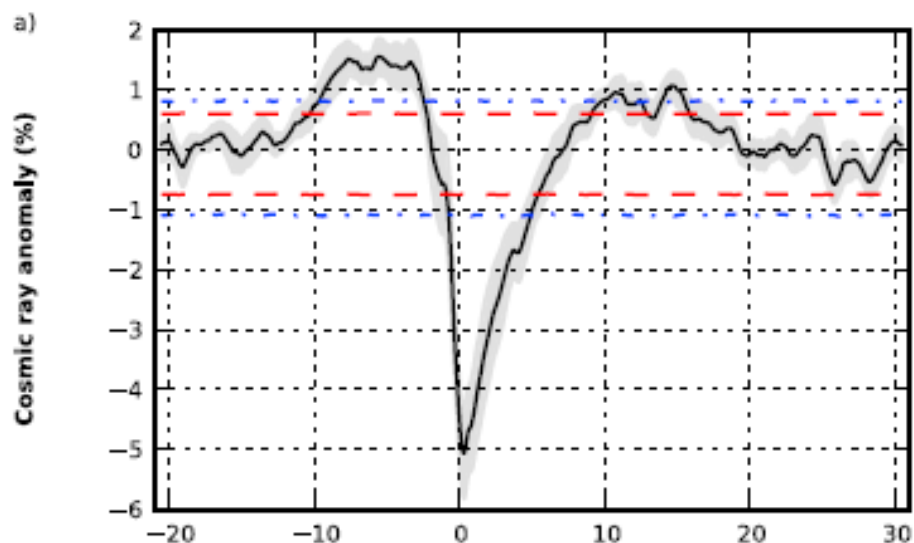
отклик на Форбуш-понижения



отклик на протонные вспышки



Влияние Форбуш-понижений интенсивности потока галактических лучей на характеристики облачности по данным MISR [Krissansen-Totton, Davies, 2013]



Результаты группы М.И. Пудовкина — О.М. Распопова — С.В.Веретененко не подтверждаются

Модельная оценка эффективности механизма влияния галактических лучей на характеристики облачности

В [Kazil et al., 2006] с использованием модели CCSM3+PLOTINUS сделана оценка климатической эффективности указанного механизма при ряде предположений, приводящих к завышению последней. Даже в этом случае

– Рост [CCN] в нижней тропосфере тропиков для $S_{\max}-S_{\min}$ не превышает 1 см^{-3} , в нижней тропосфере средних широт – до $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$. Для сравнения: фоновые значения [CCN] – $10^3-10^4 \text{ см}^{-3}$.

– Однако сильное насыщение эффекта интенсификации формирования облачных капель при росте концентрации ядер конденсации приводит к тому, что рост $n_{\text{drop}} \leq 28\%$ для $S_{\max}-S_{\min}$, а $\text{PVB} \leq 0.24 \text{ Вт м}^{-2}$.

– Дополнительно отклик ослабевает из-за того, что для солнечного PVB временной масштаб равен 11 лет, для других PVB – десятилетия и столетия.

Механизм влияния солнечной активности на характеристики облачности [Жеребцов и др., 2005] (1)



+: Электрическая проводимость в полярных широтах наиболее чувствительна к вариациям геомагнитного поля Земли

-: 1. Действие механизма ограничено полярной областью, площадь которой мала.

2. Эффективность нижних облаков в перераспределении тепловой радиации невелика.

Механизм влияния солнечной активности на характеристики облачности [Жеребцов и др., 2005] (2)

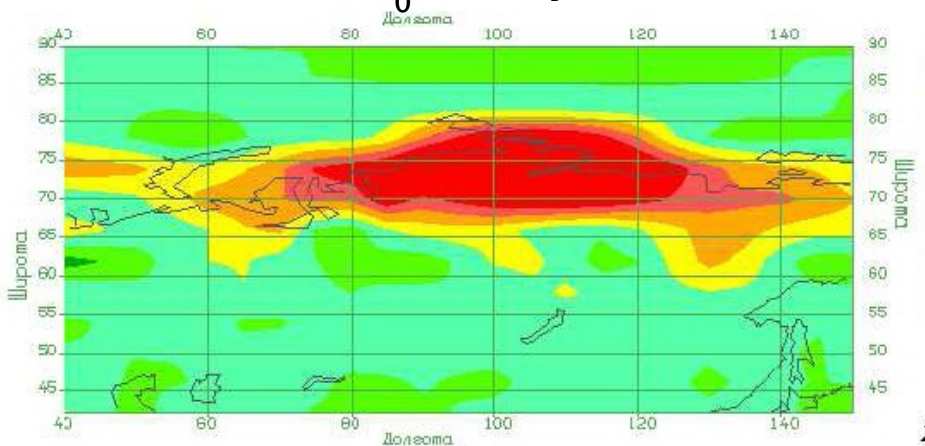
по результатам [Фоменко, Курбацкая, 2006]

С МОЦА ИВМиМГ СО РАН при задании климатологических значений ТПО были проведены численные эксперименты:

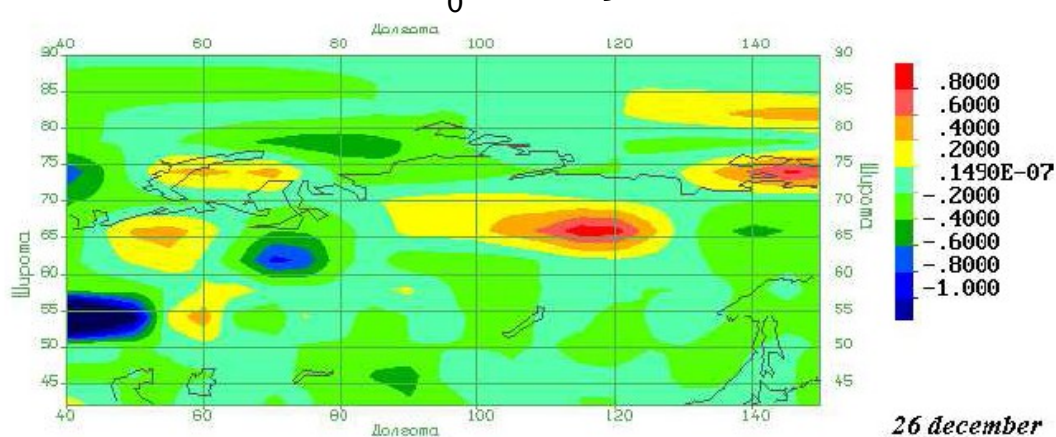
1. контрольный (количество облаков n рассчитывается интерактивно);
2. аномальный (n над сушей севернее 68°N в день $d_0 = 22.\text{XII}$ увеличивается в 2 раза, затем для расчёта n используются стандартные схемы модели).

Представлена разность температуры приземного воздуха "эксперимент 2 – эксперимент 1".

$d_0 + 1$ сут.



$d_0 + 4$ сут.



Глобальный отклик мал

Выводы

Установлены и подтверждены экспериментально механизмы влияния солнечной активности на ЗКС, связанные с

- прямым РВВ за счёт изменения солнечной постоянной,
- с влиянием на содержание озона в атмосфере изменения спектрального состава солнечного излучения и интенсивности потока галактических частиц.

Эти механизмы или уже учитываются в расчётах с климатическими моделями или включение их учёта можно ожидать в ближайшем будущем.

Механизмы, связанные с воздействием солнечной активности на характеристики облачности, предложенные к настоящему времени, требуют более детальной эмпирической и модельной аргументации.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ