



# **КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ: ПРИЧИНЫ И ПРОЦЕССЫ. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ АСПЕКТЫ ОТКЛИКА КЛИМАТА НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**А.В. Елисеев<sup>1-3</sup>**

- 1. физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова**
- 2. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН**
- 3. Институт прикладной физики РАН**

**"НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ-2022"**

# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

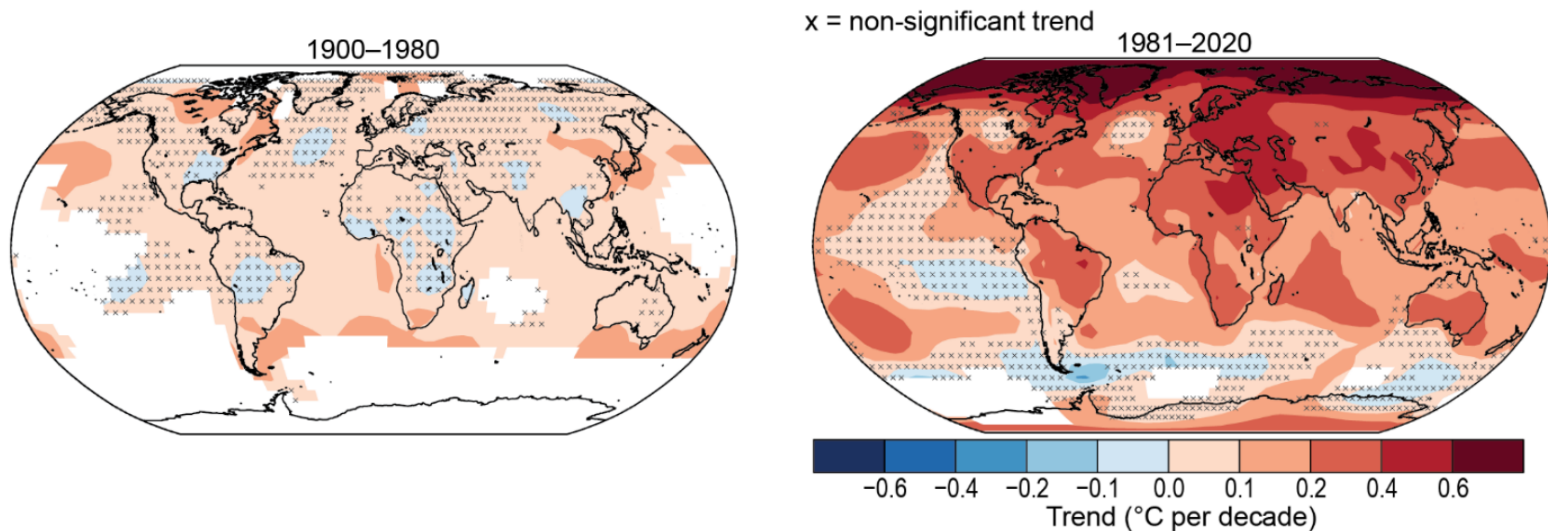
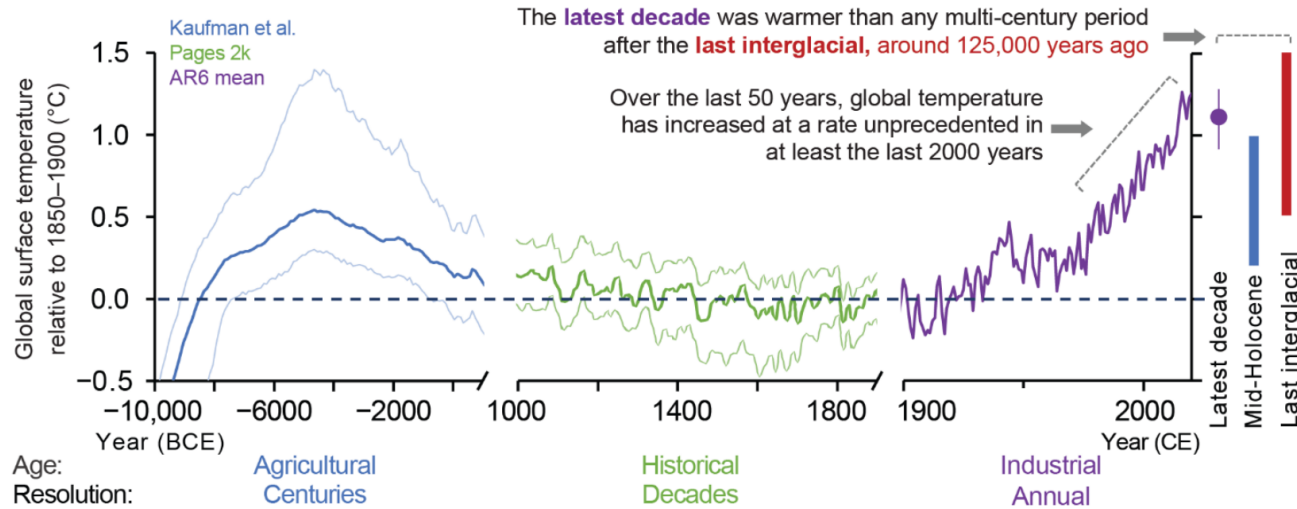
## Выводы

# Диагностика современных климатических изменений.

## 1. Среднегодовая температура приповерхностного воздуха.

[IPCC WG1 AR6, рис. 2.11]

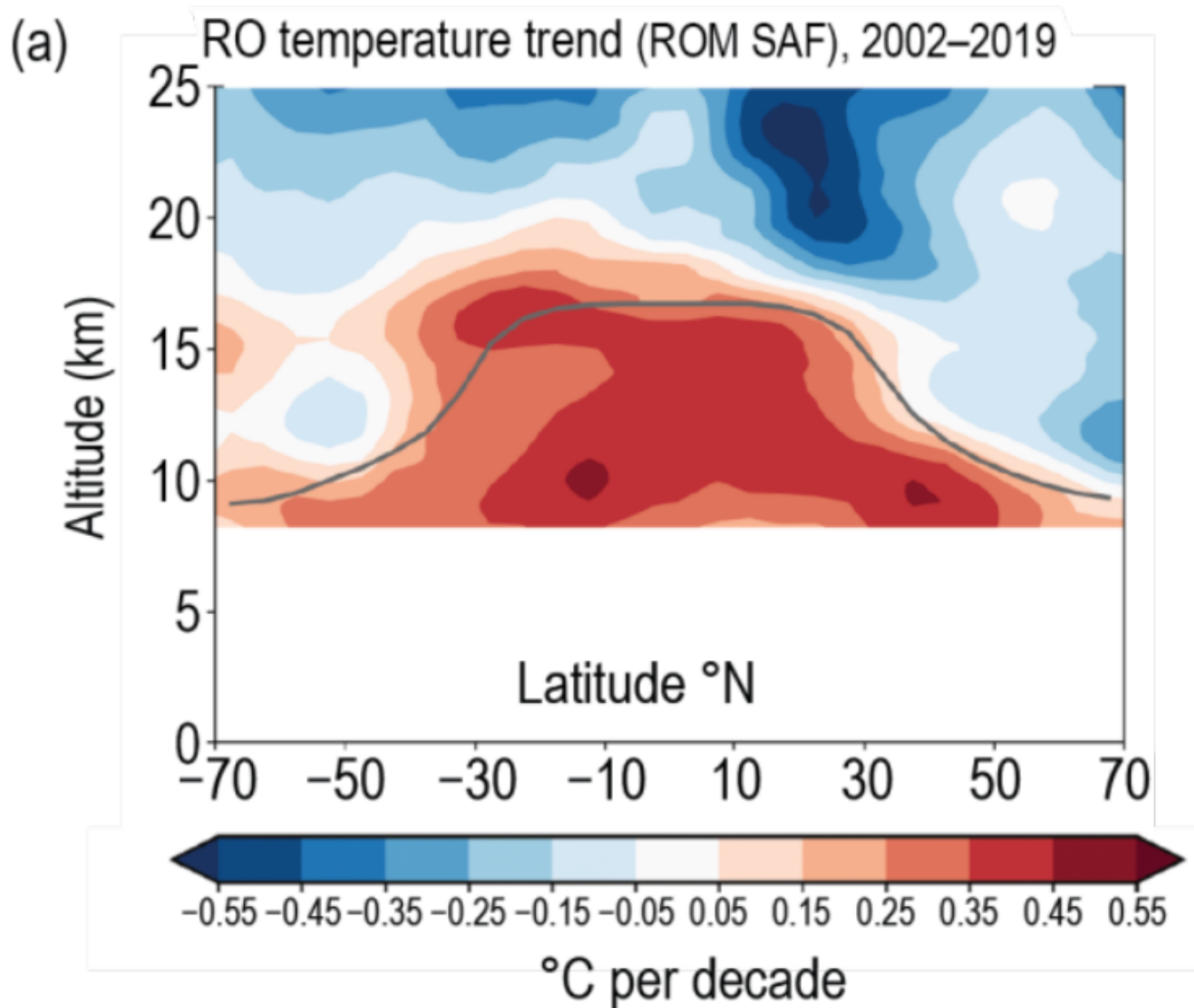
(a) Global surface temperatures are more likely than not unprecedented in the past 125,000 years



## Диагностика современных климатических изменений.

### 2. Вертикальная структура изменений температуры

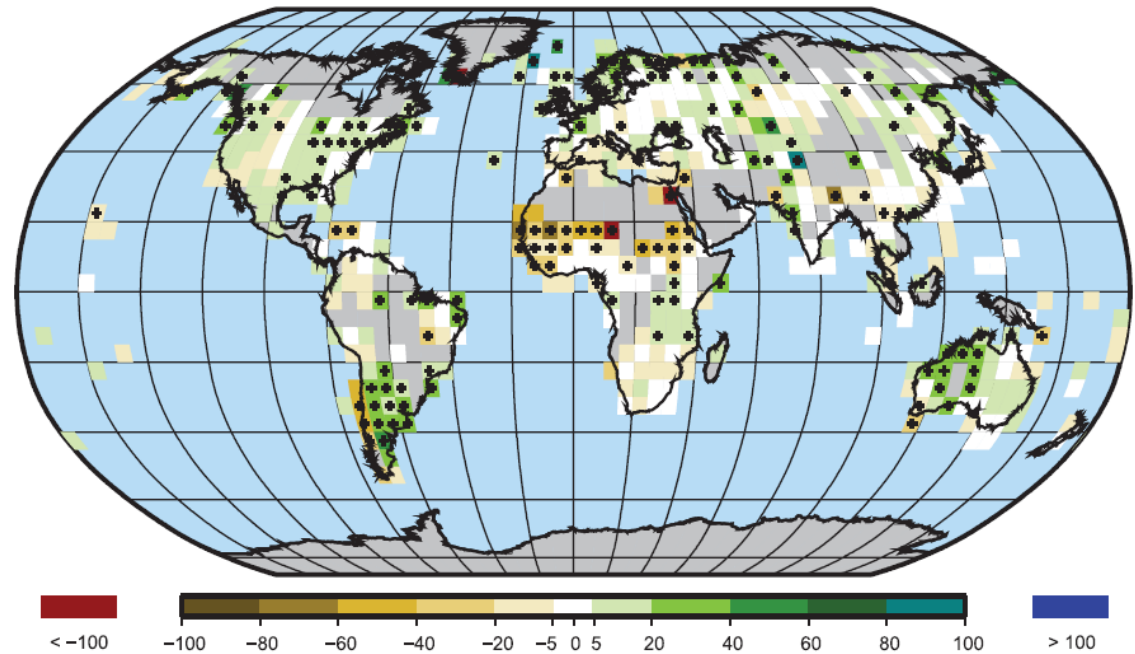
[IPCC WG1 AR6, рис. 2.12]



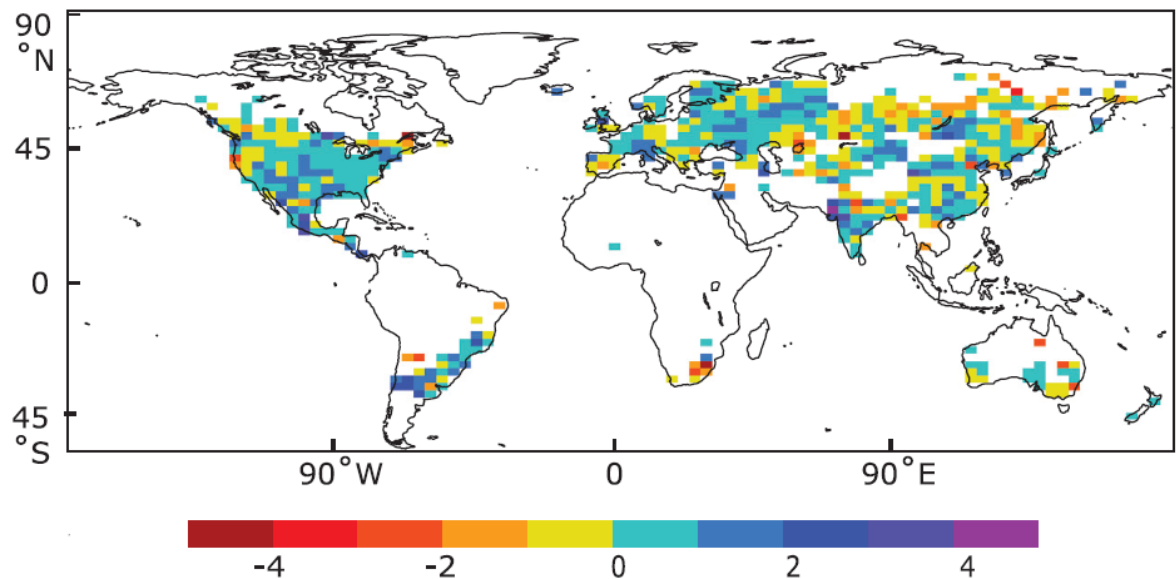
# Диагностика современных климатических изменений.

## 3. Изменение осадков

коэффициент тренда  
годовых осадков,  
1901–2005 гг.  
[%/столетие]

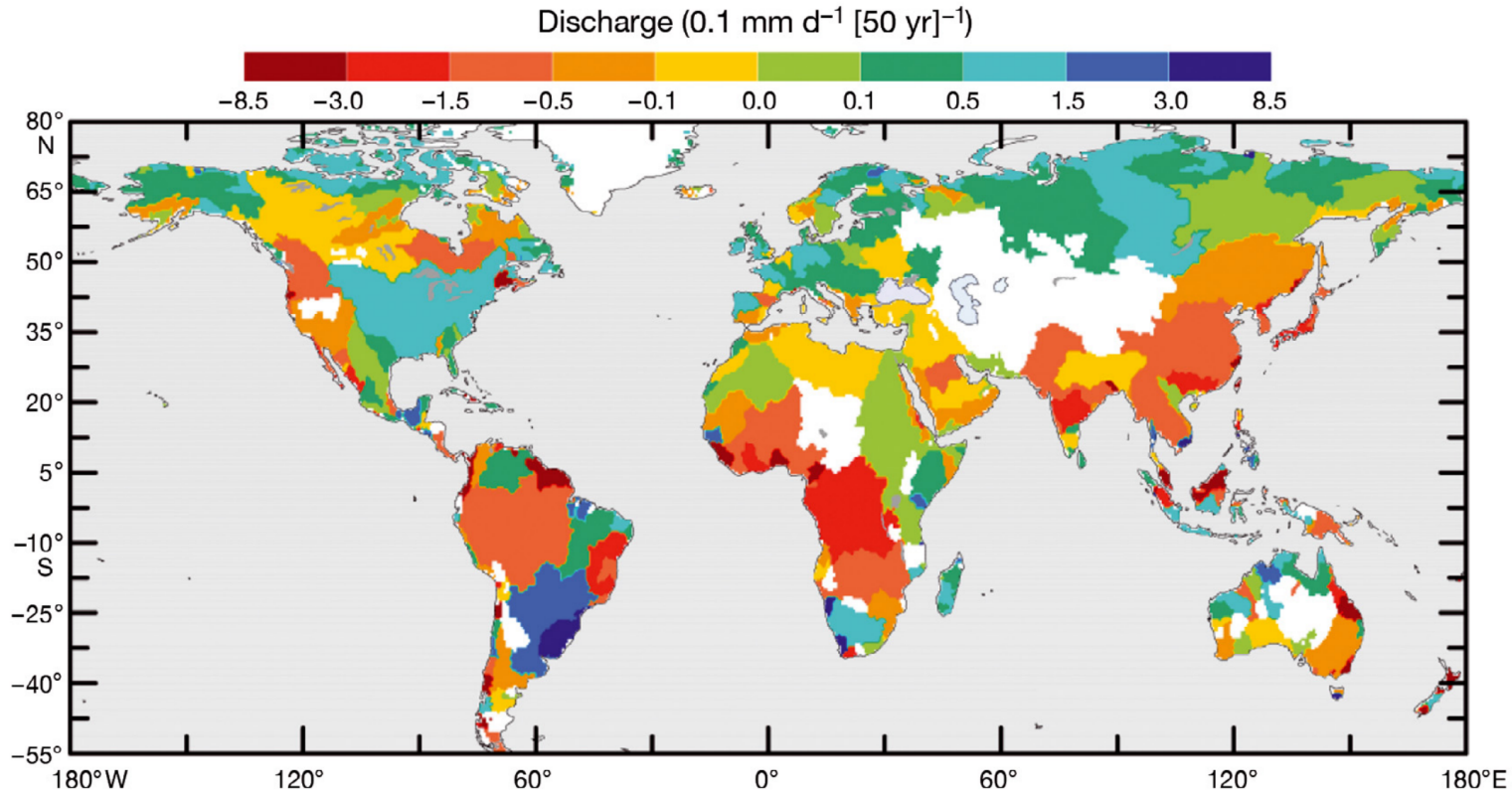


коэффициент тренда  
вклада в изменение  
осадков дней с  
осадками,  
интенсивность  
которых  $>95\%$ ,  
1951–2003 гг.  
[%/десятилетие]



## Диагностика современных климатических изменений.

### 4. Изменение стока основных рек, 1948–2004 [Dai et al., 2009]



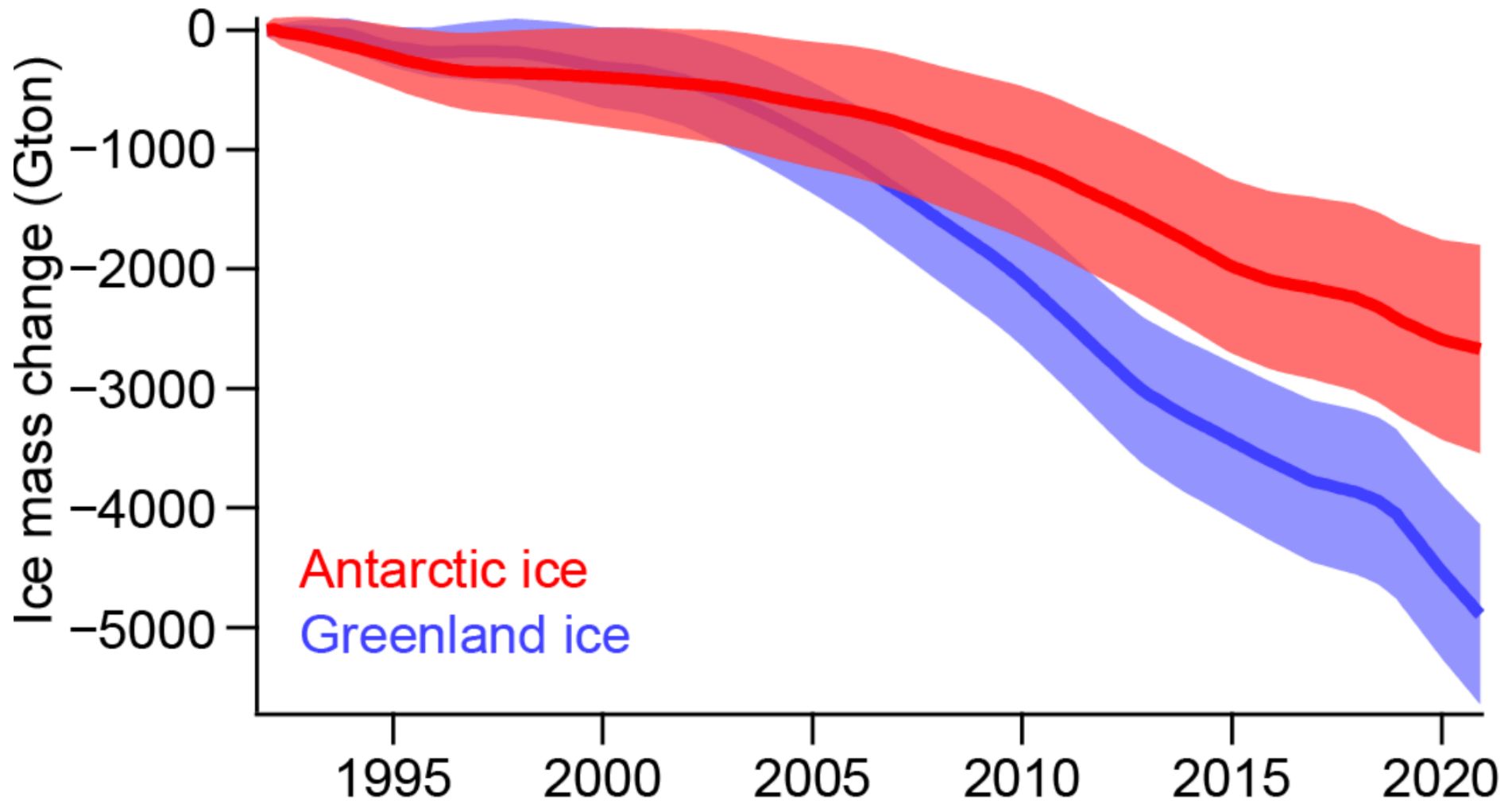
Сток представлен в виде

$$R = V / A$$

$V$  – объём воды, проходящий через устье в единицу времени на гидропостах  
 $A$  – площадь водосбора

## Диагностика современных климатических изменений.

### 5. Изменение массы ледовых щитов (по данным спутниковой альтиметрии) [IPCC WG1 AR6, рис. 2.24]





## А что дальше?

### Сценарии Shared Socioeconomic Pathways (SSP) (1)

Предположения о развитии экономики, технологий и общества

**SSP1: Sustainability (Taking the Green Road):**

Устойчивое развитие, "зелёные" технологии, углеродно-нейтральная экономика с 2050–2075 г.

**SSP5: Fossil-Fueled Development (Taking the Highway):**

Быстрое развитие с высоким использованием ископаемого топлива,  $E_{CO_2}$  утраиваются к 2100 г., возможна геоинженерия

**SSP2: Middle of the road**  
Сохранение регионального неравенства, неравномерное движение к "зелёным технологиям", эмиссии ПГ близки к современным вплоть до 2050 г., затем уменьшаются

**SSP3: Regional rivalry (A Rocky Road):**

Резкое соперничество между странами, низкие вложения в развитие общества и технологий,  $E_{CO_2}$  – нулевые к 2100 г.

**SSP4: Inequality (A Road Divided):**

Разделение стран на "успешные" и "отсталые", медленный переход к низкоуглеродной энергетике  $E_{CO_2}$  удваиваются к 2100 г.

- Выход за пределы естественных наук (нужны экономика, социология);
- Возможен непрерывный "спектр" сценариев, но выбираются представительные для данного набора предположений;
- Вероятность реализации каждого из сценариев неизвестна.

## А что дальше?

### Сценарии Shared Socioeconomic Pathways (SSP) (1)

Предположения о развитии экономики, технологий и общества

**SSP1: Sustainability (Taking the Green Road):**

Устойчивое развитие, "зелёные" технологии, углеродно-нейтральная экономика с 2050–2075 г.

**SSP5: Fossil-Fueled Development (Taking the Highway):**

Быстрое развитие с высоким использованием ископаемого топлива,  $E_{CO_2}$  утраиваются к 2100 г., возможна геоинженерия

**SSP2: Middle of the road**  
Сохранение регионального неравенства, неравномерное движение к "зелёным технологиям", эмиссии ПГ близки к современным вплоть до 2050 г., затем уменьшаются

**SSP3: Regional rivalry (A Rocky Road):**

Резкое соперничество между странами, низкие вложения в развитие общества и технологий,  $E_{CO_2}$  – нулевые к 2100 г.

**SSP4: Inequality (A Road Divided):**

Разделение стран на "успешные" и "отсталые", медленный переход к низкоуглеродной энергетике  $E_{CO_2}$  удваиваются к 2100 г.

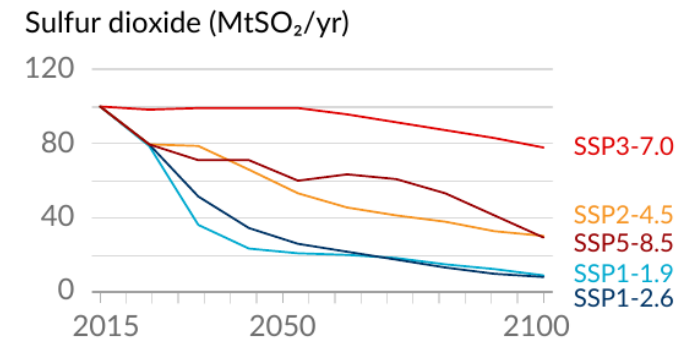
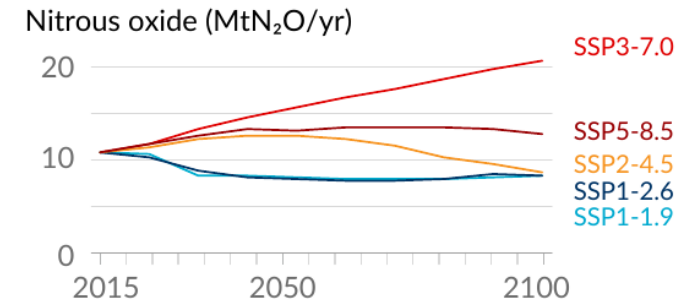
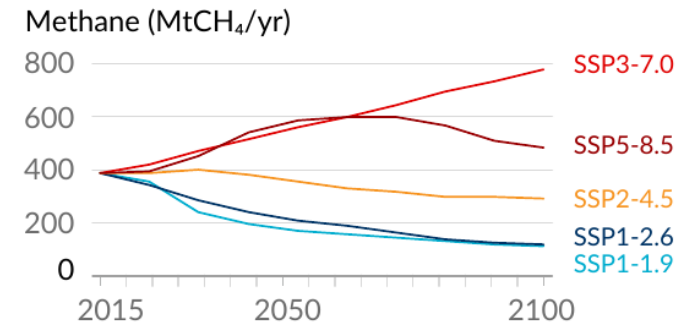
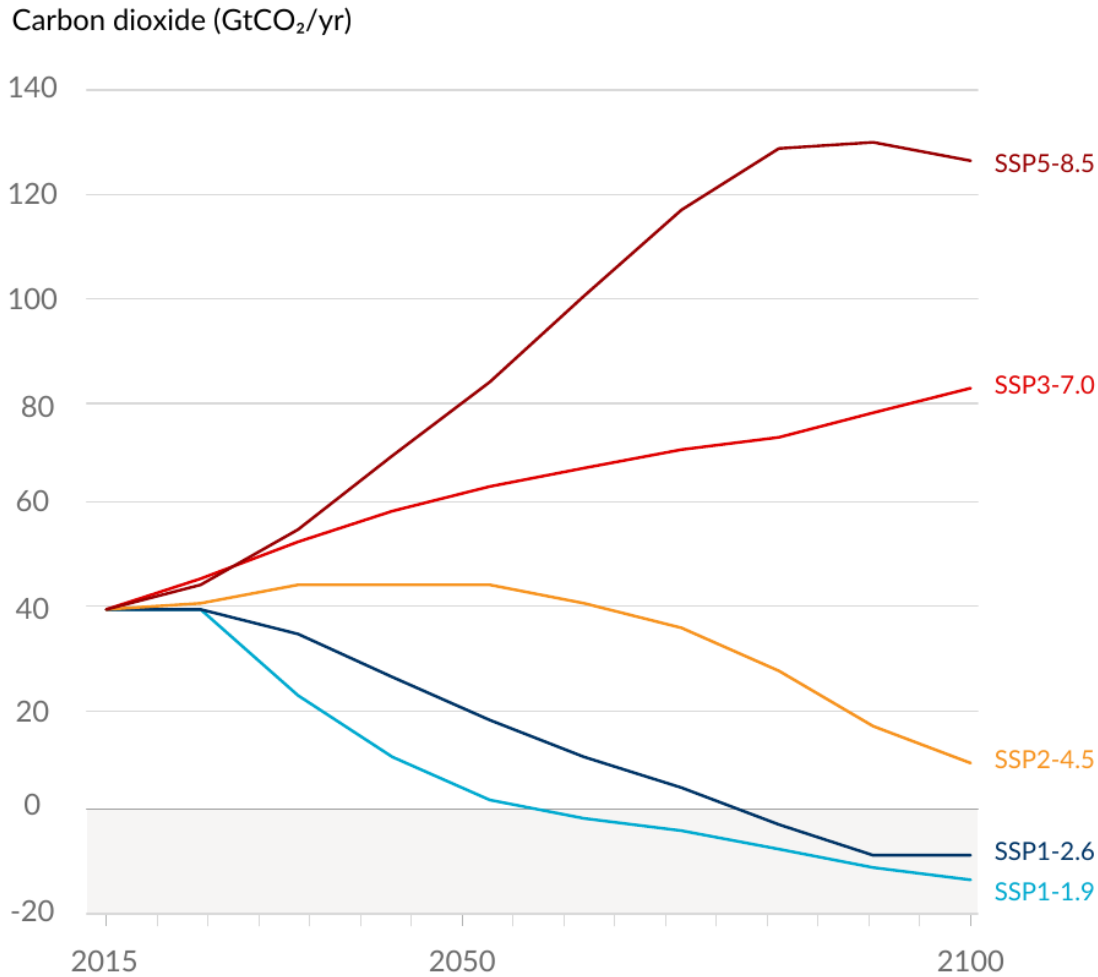
- Выход за пределы естественных наук (нужны экономика, социология);
- Возможен непрерывный "спектр" сценариев, но выбираются представительные для данного набора предположений;
- Вероятность реализации каждого из сценариев неизвестна.

**Смысл:**

- проведение взаимно согласованных расчётов с моделями Земной системы;
- ответ на вопрос: "А что, если ..."

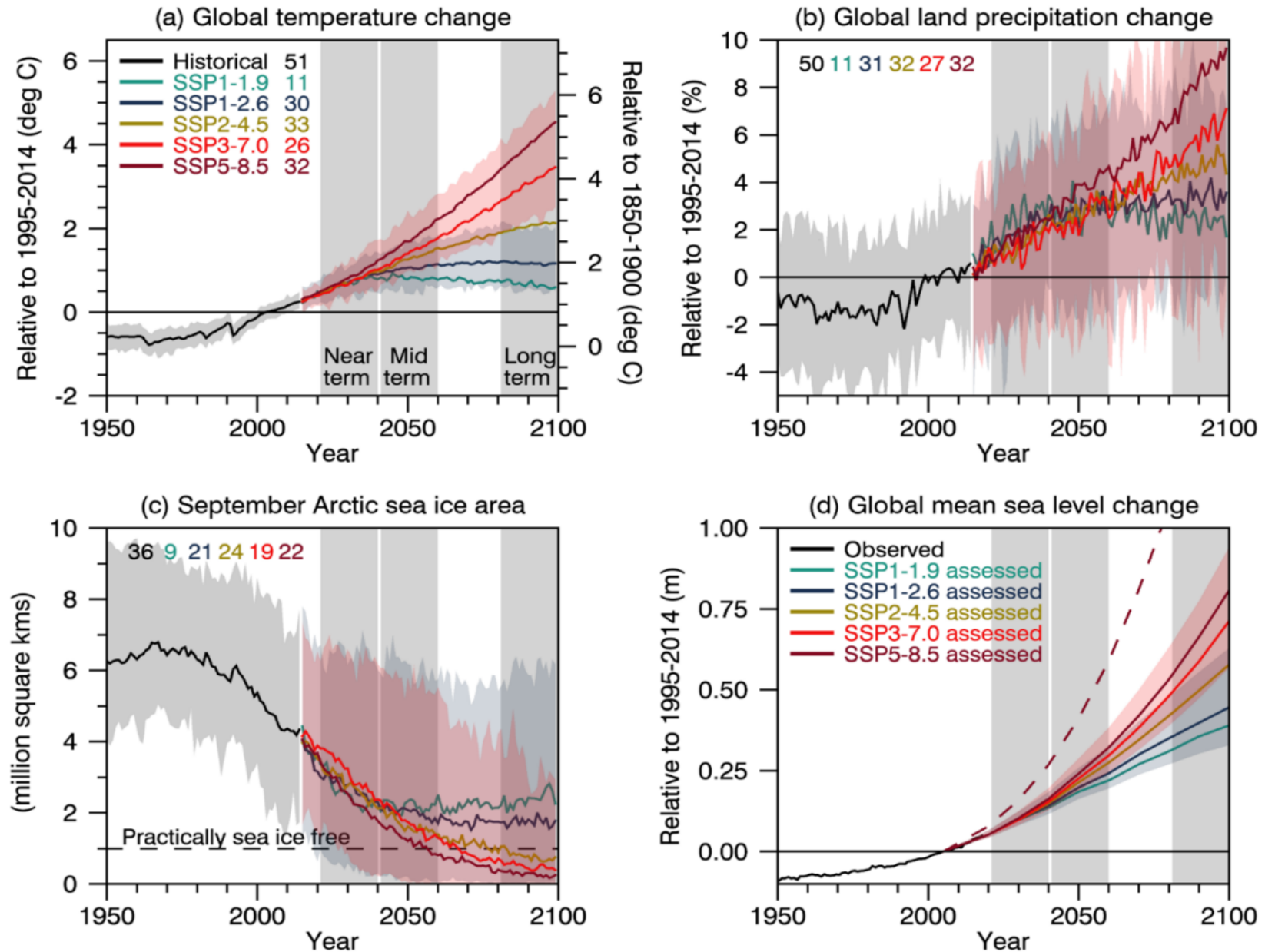
# А что дальше?

## Сценарии внешних воздействий Shared Socioeconomic Pathways (SSP) (2)

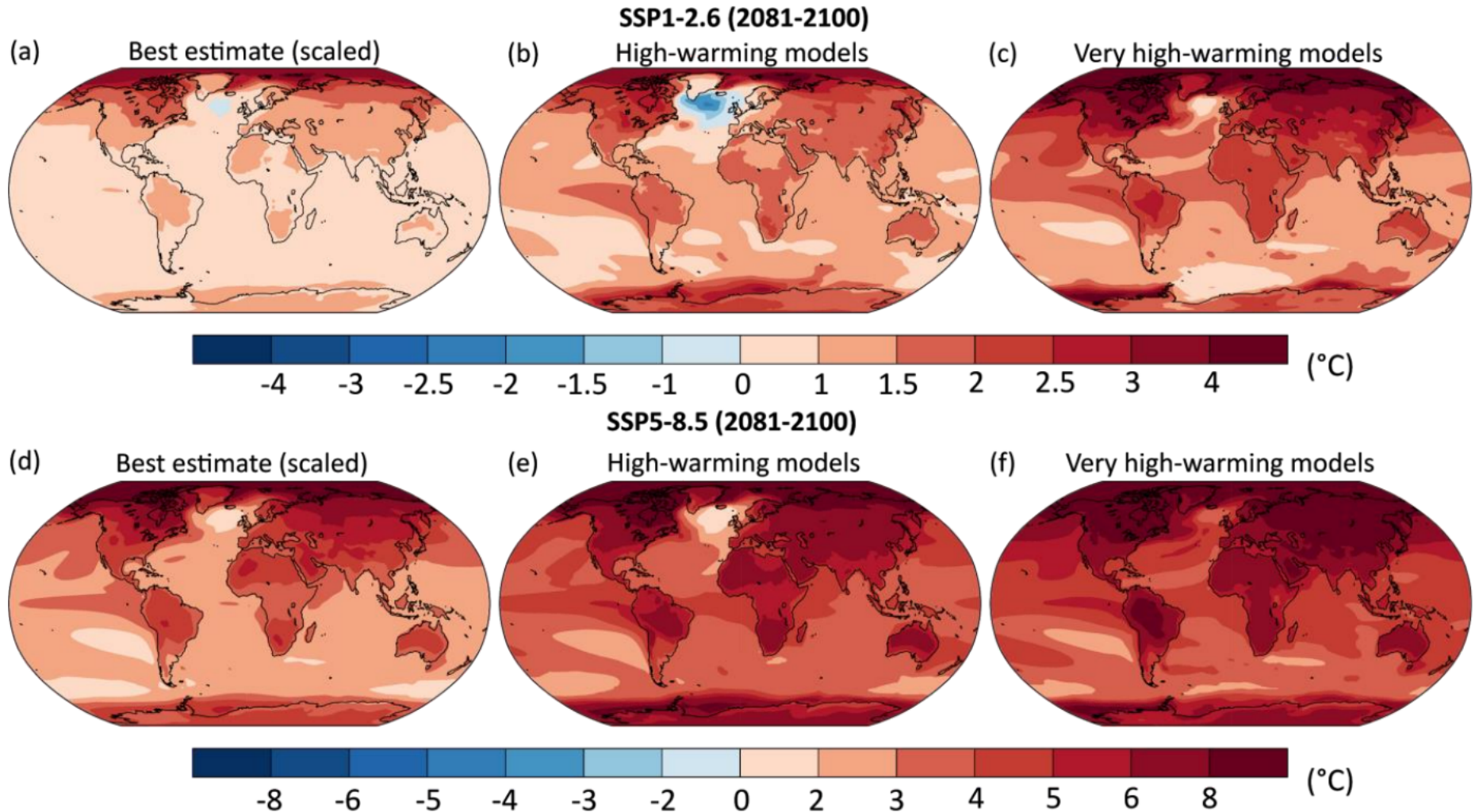


Неопределённость прогноза не может быть меньше неопределённости сценариев воздействий на Земную систему

# Оценки будущих изменений климата. Среднеглобальные характеристики, ансамбль моделей CMIP6



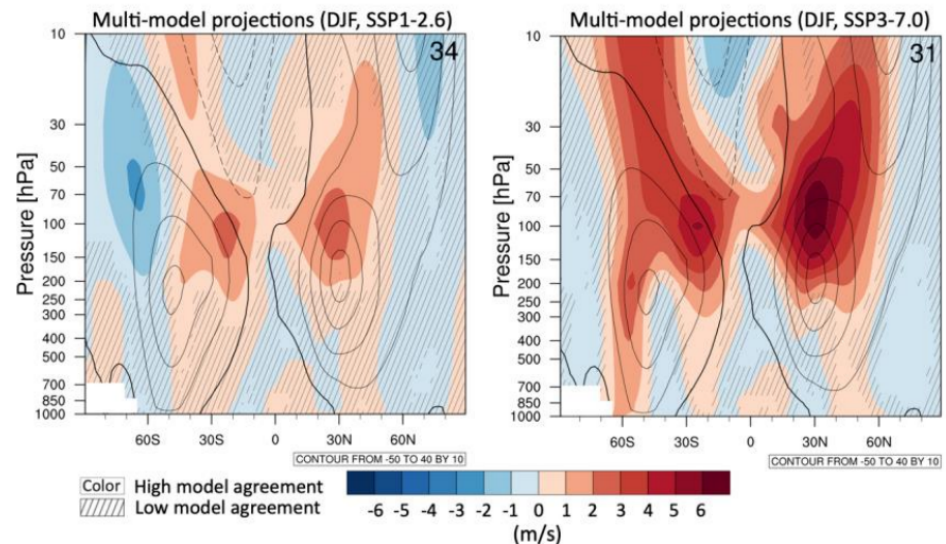
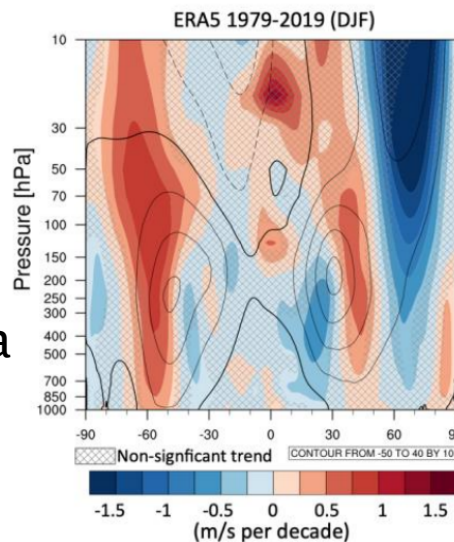
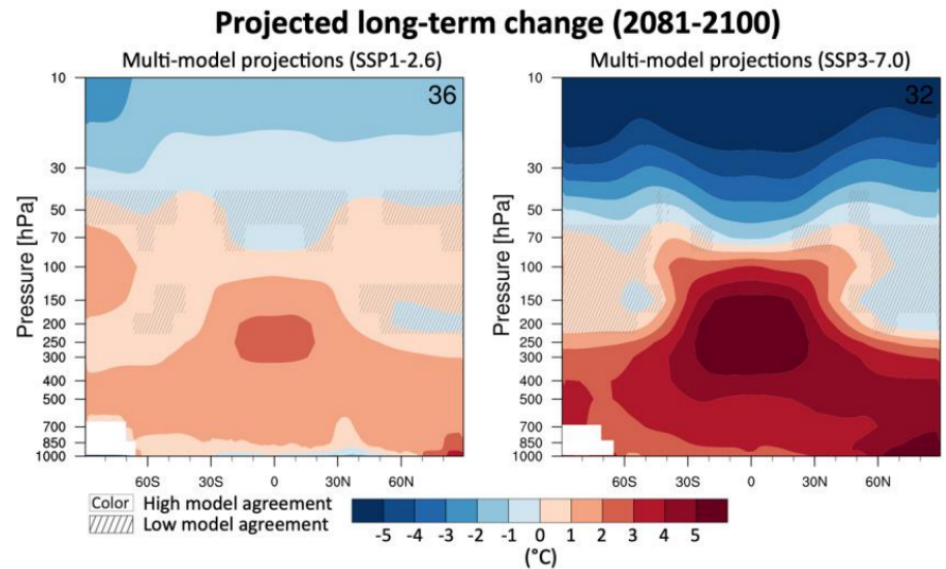
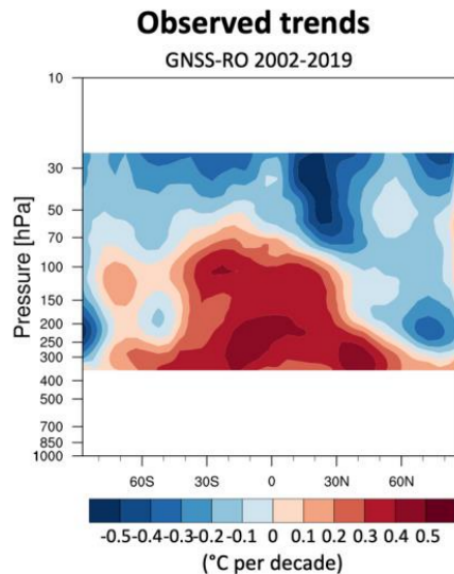
# Оценки будущих изменений климата. Приземная температура, ансамбль моделей CMIP6 [IPCC WG1 AR6, рис. TS.3-1]



# Оценки будущих изменений климата. Зональные средние, ансамбль моделей CMIP6 [IPCC WG1 AR6, рис. TS.3-1]

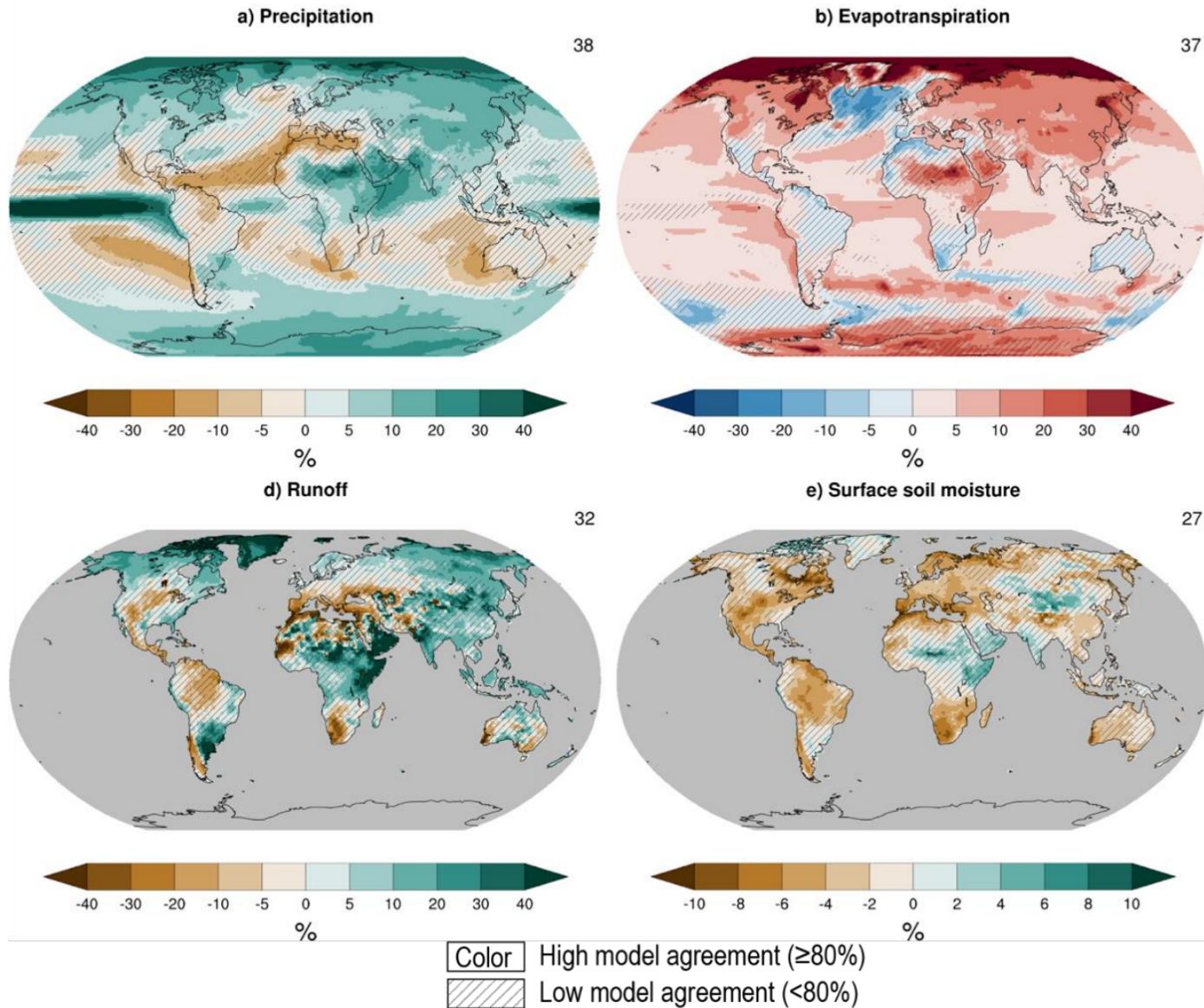
температура

зональный ветер  
(декабрь-февраль),  
изолинии –  
многолетнее среднее,  
заливка –  
коэффициенты тренда  
(слева) или изменения  
(в центре и справа)

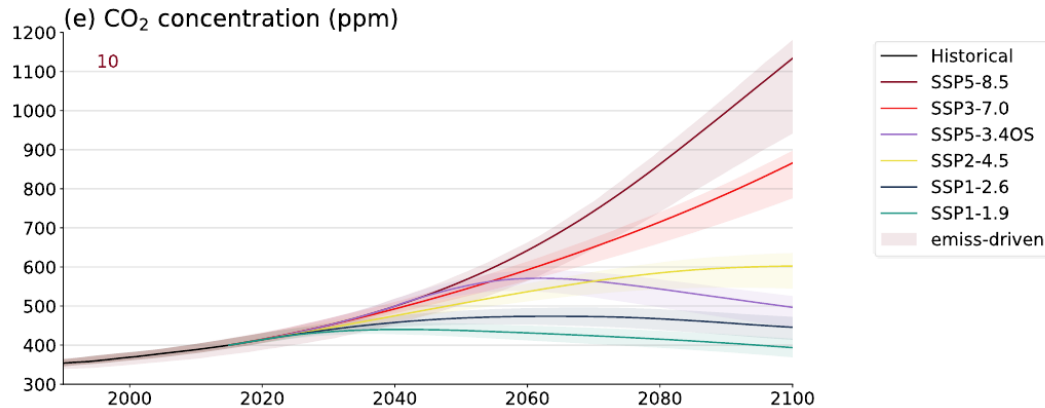
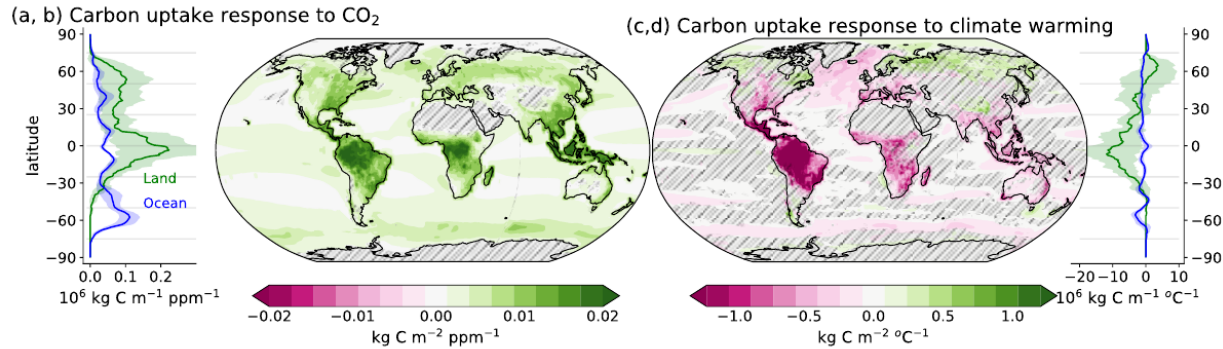


# Оценки будущих изменений климата. Гидрологический цикл, ансамбль моделей CMIP6 [IPCC WG1 AR6, рис. TS.6]

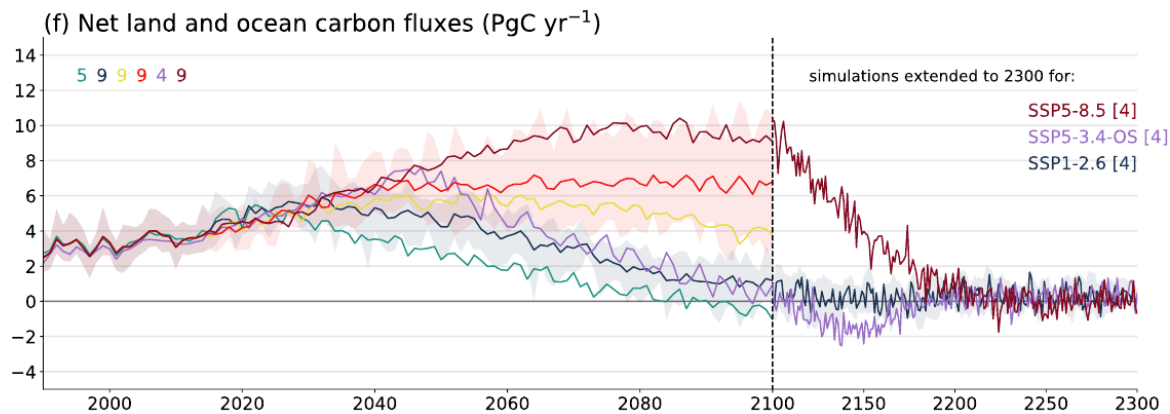
Long term water cycle variables changes for SSP2-4.5 (2081-2100 vs 1995-2014)



# Оценки будущих изменений климата. Углеродный цикл, ансамбль моделей CMIP6 [IPCC WG1 AR6, рис. TS.5]



2020 г. : 412 млн<sup>-1</sup>  
(беспрецедентна  
для 2 млн. лет)

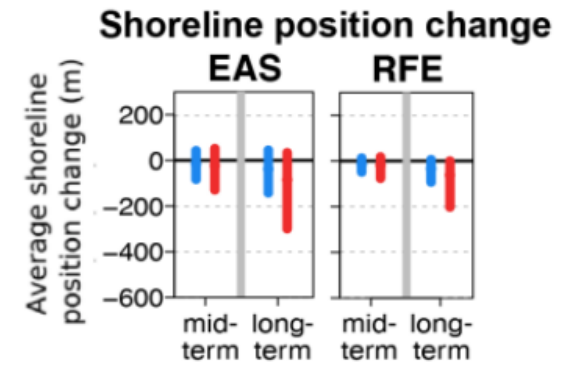
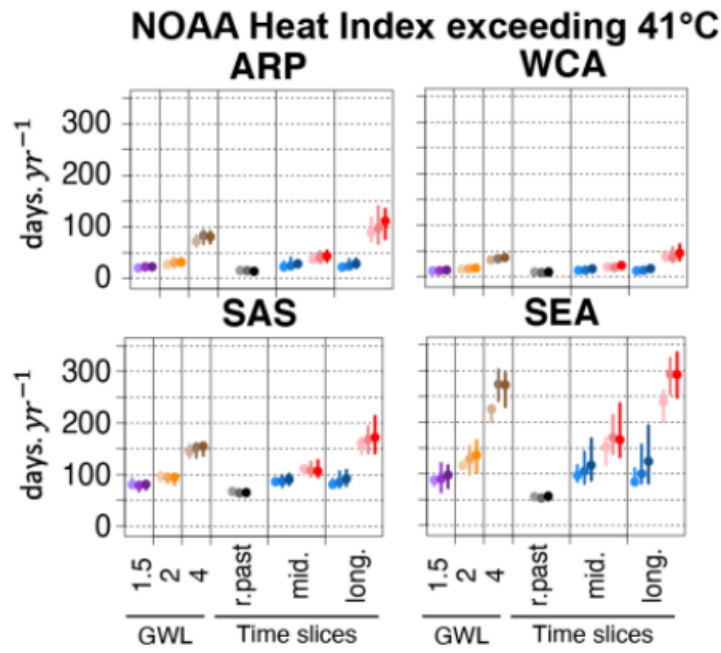
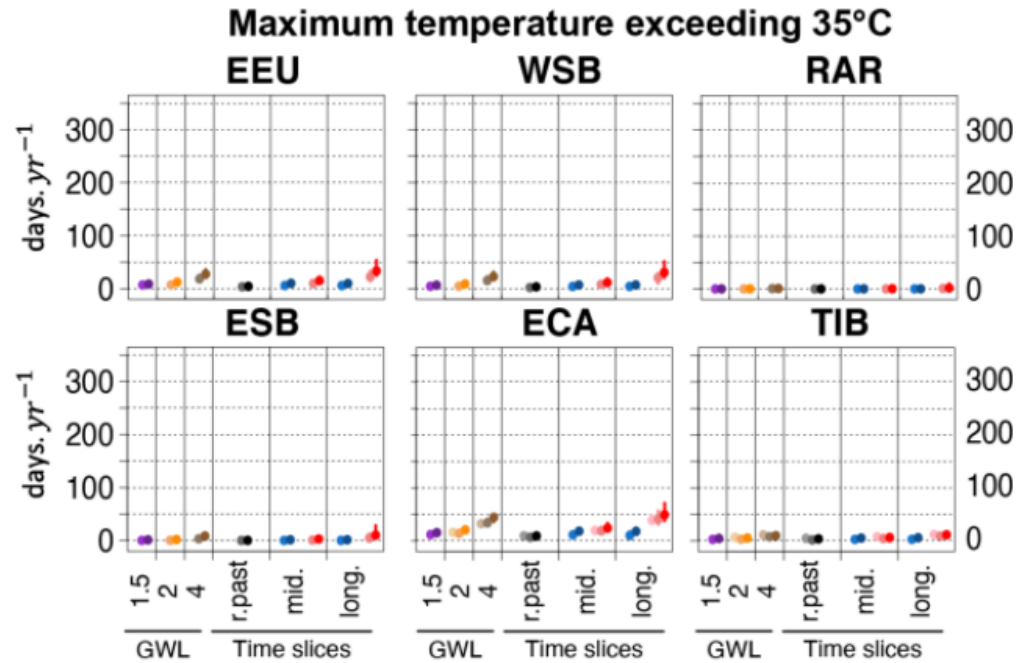
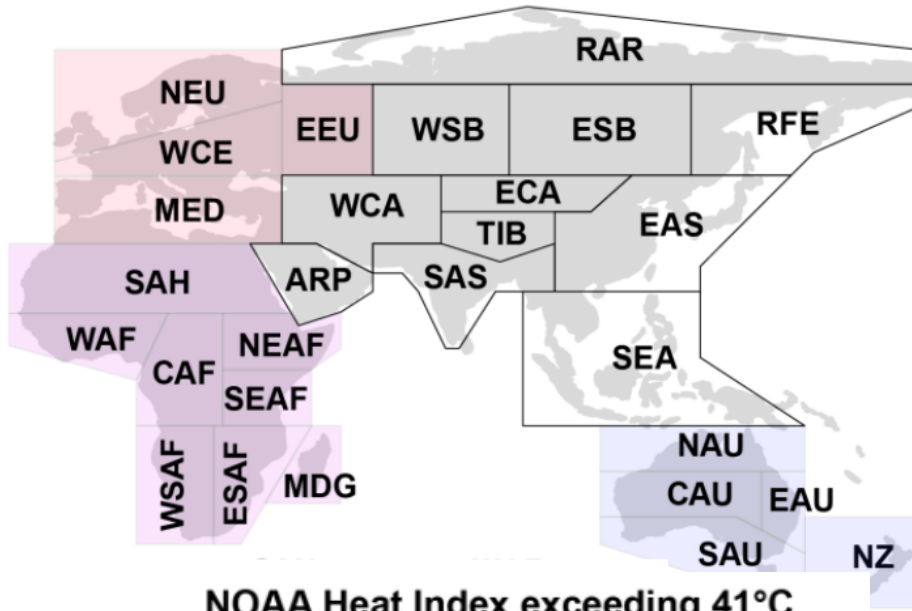


(g) Sink fraction

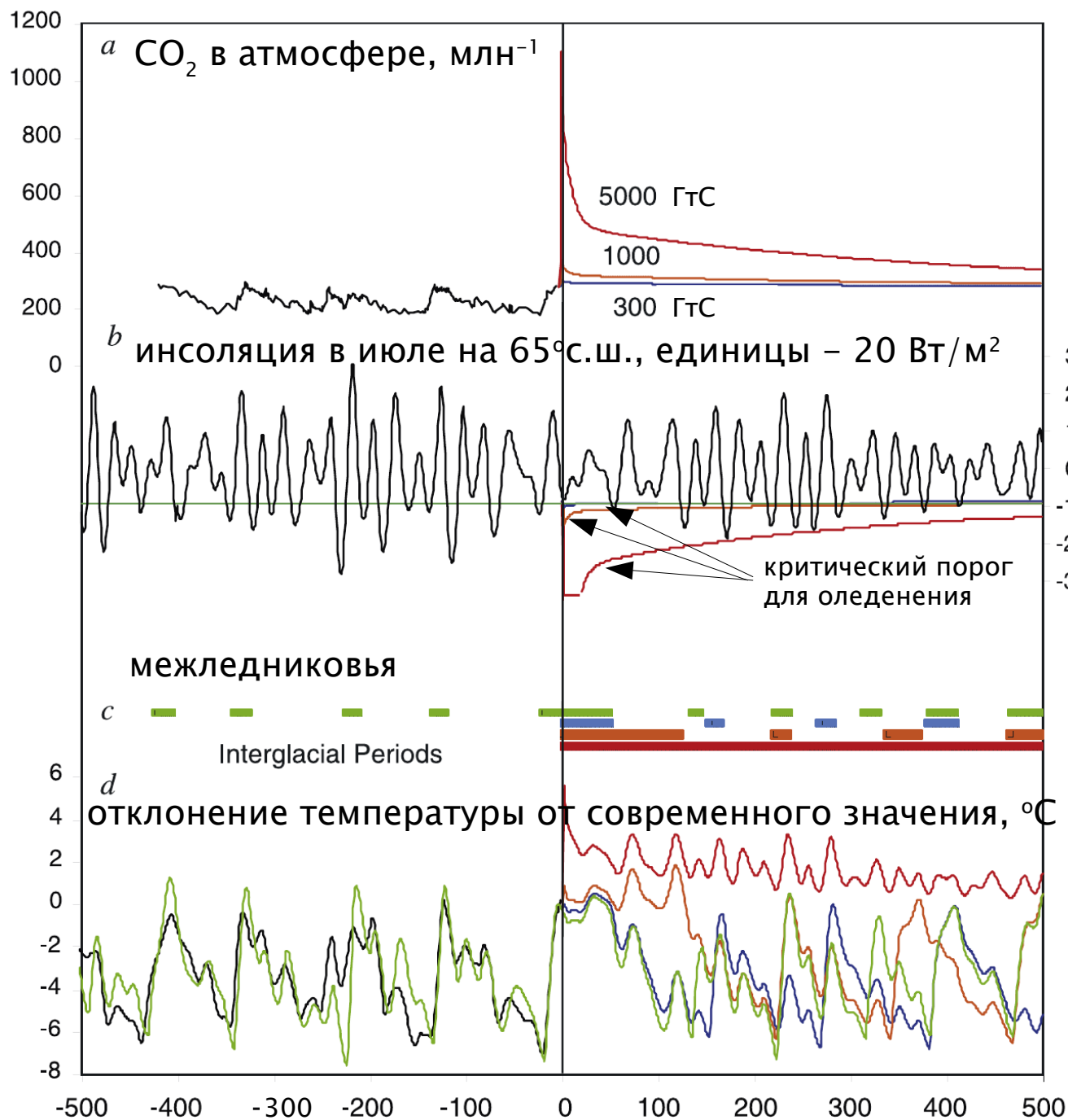


# Оценки будущих изменений климата.

## Экстремальные природные явления, ансамбль моделей CMIP6 [IPCC WG1 AR6, рис. TS.25]



# Когда будет следующий ледниковый период? [Archer. Ganopolski. 2005]



Накопление CO<sub>2</sub> в атмосфере и соответствующий парниковый эффект может привести к тому, что следующее (по астрономической теории оледенение) человечество пропустит (уже сейчас выброшено ~ 500 ГтС).

Численные эксперименты с моделью Земной системы при различных суммарных антропогенных эмиссиях CO<sub>2</sub> в атмосферу

ГтС – гигатонна углерода (масса CO<sub>2</sub> будет больше в  $(12+2*16)/12 = 3,67$  раз)

# План

## Часть I

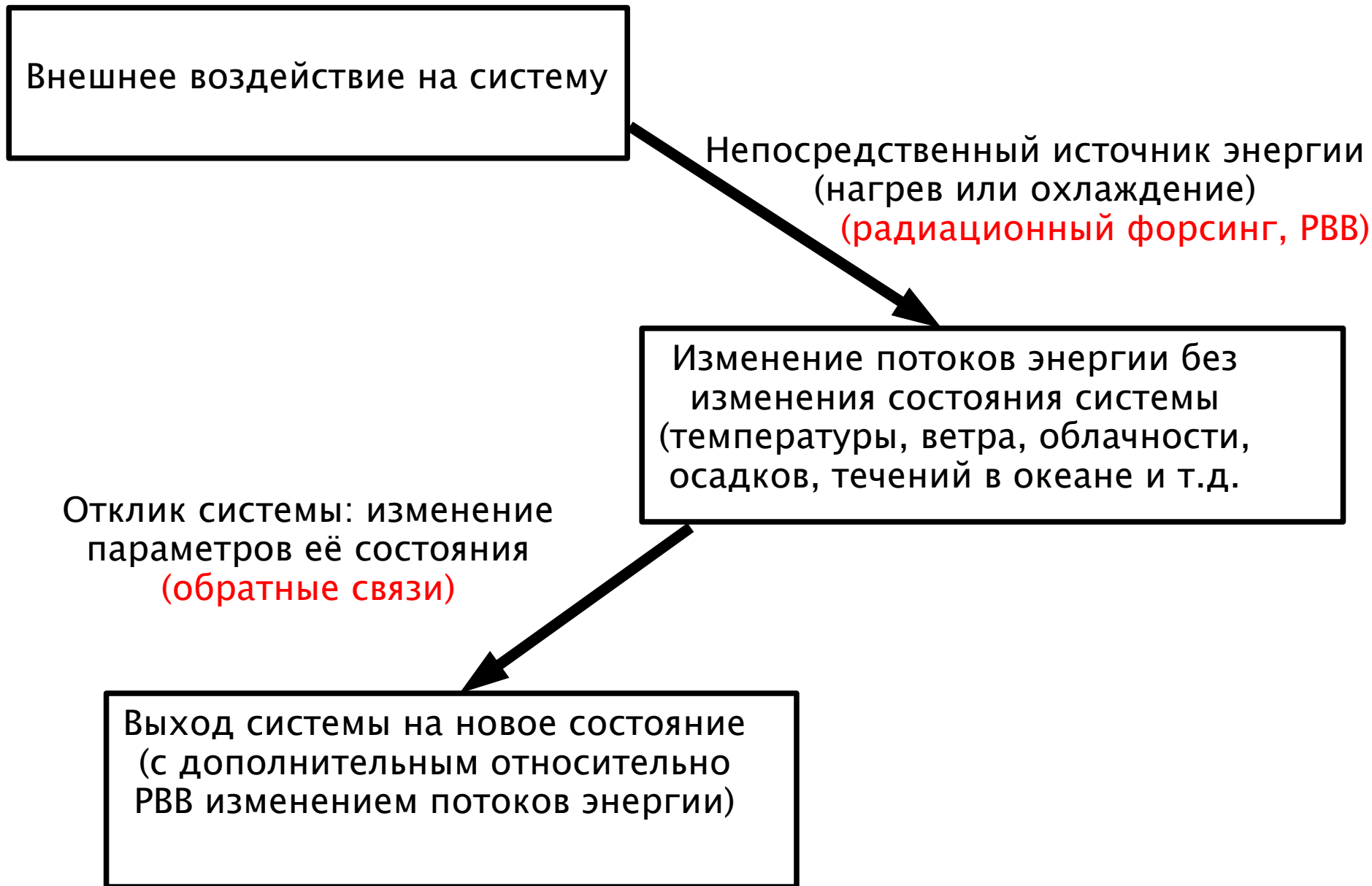
- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

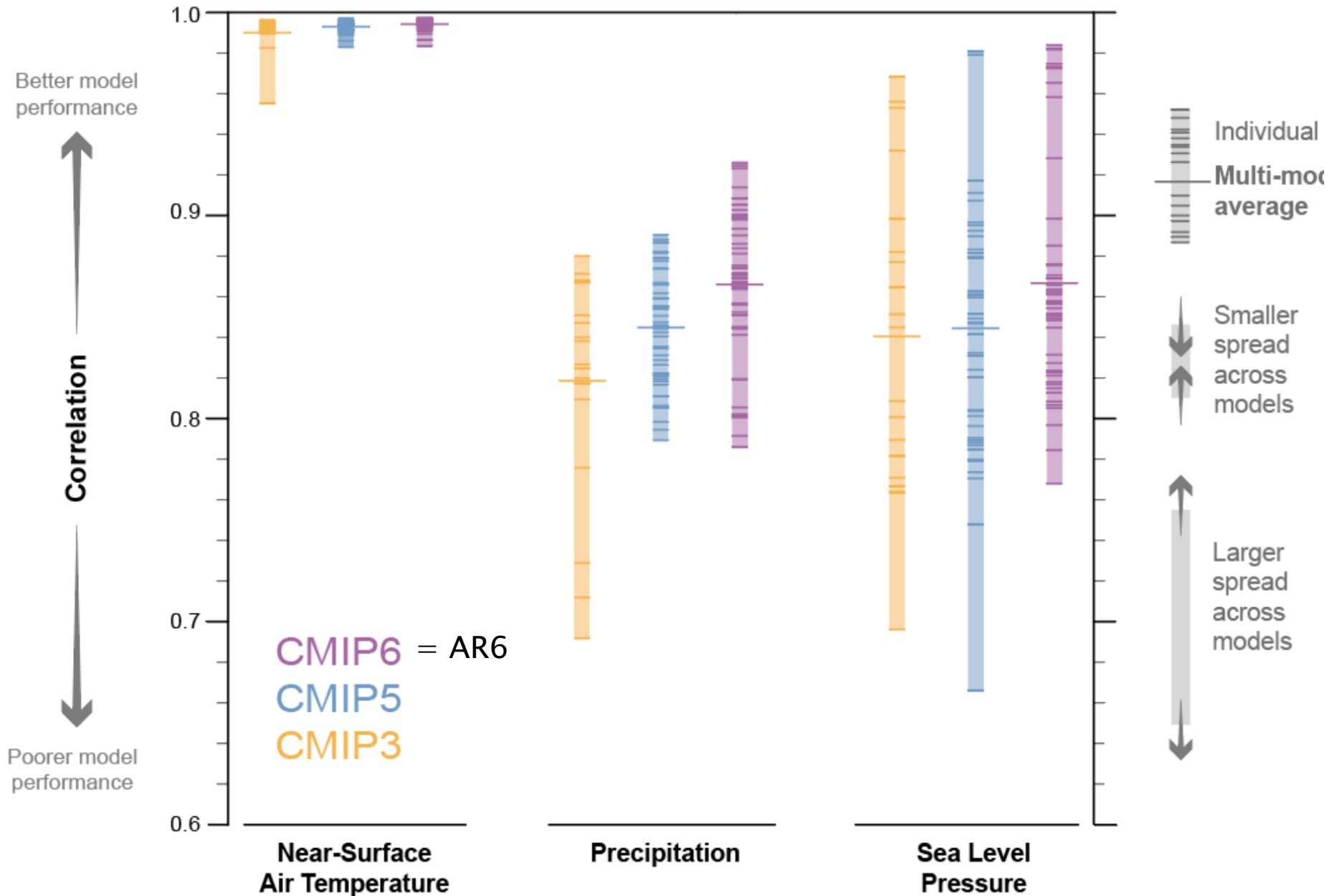
## Выводы

## Радиационный форсинг (радиационное возмущающее воздействие)



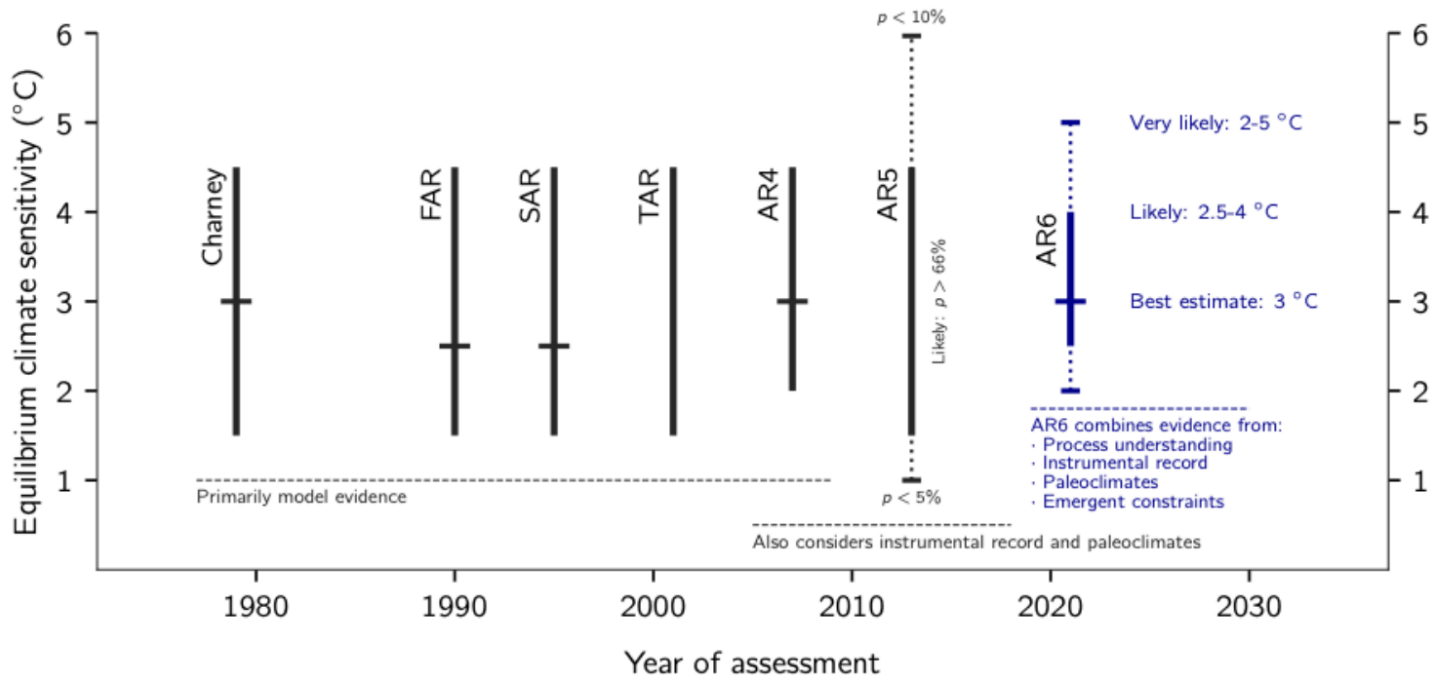
# Качество современных моделей [IPCC WG1 AR6, FAQ 3.3]

## Skill of models at reproducing observations

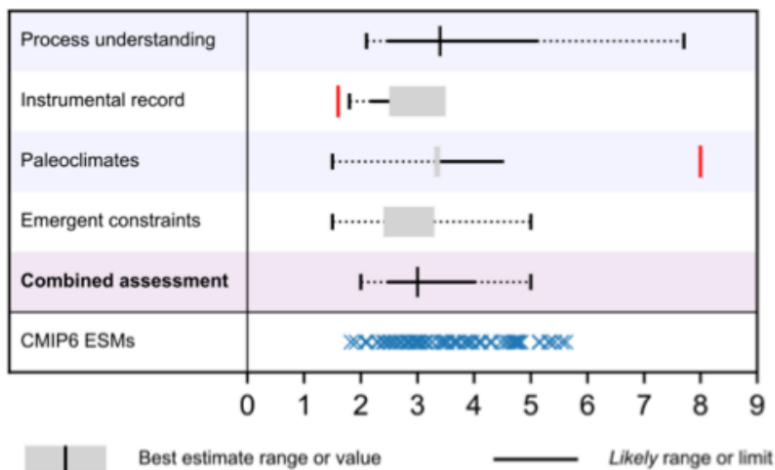


# Чувствительность современных моделей климата [IPCC WG1 AR6, рис. TS.16]

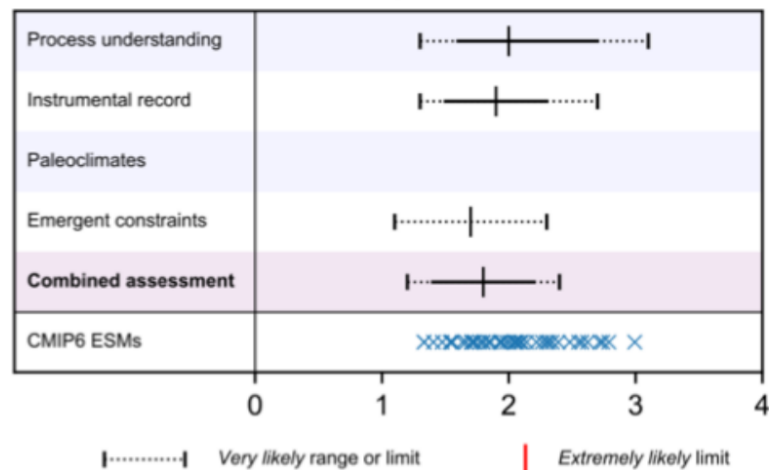
a) Evolution of equilibrium climate sensitivity assessments from Charney to AR6



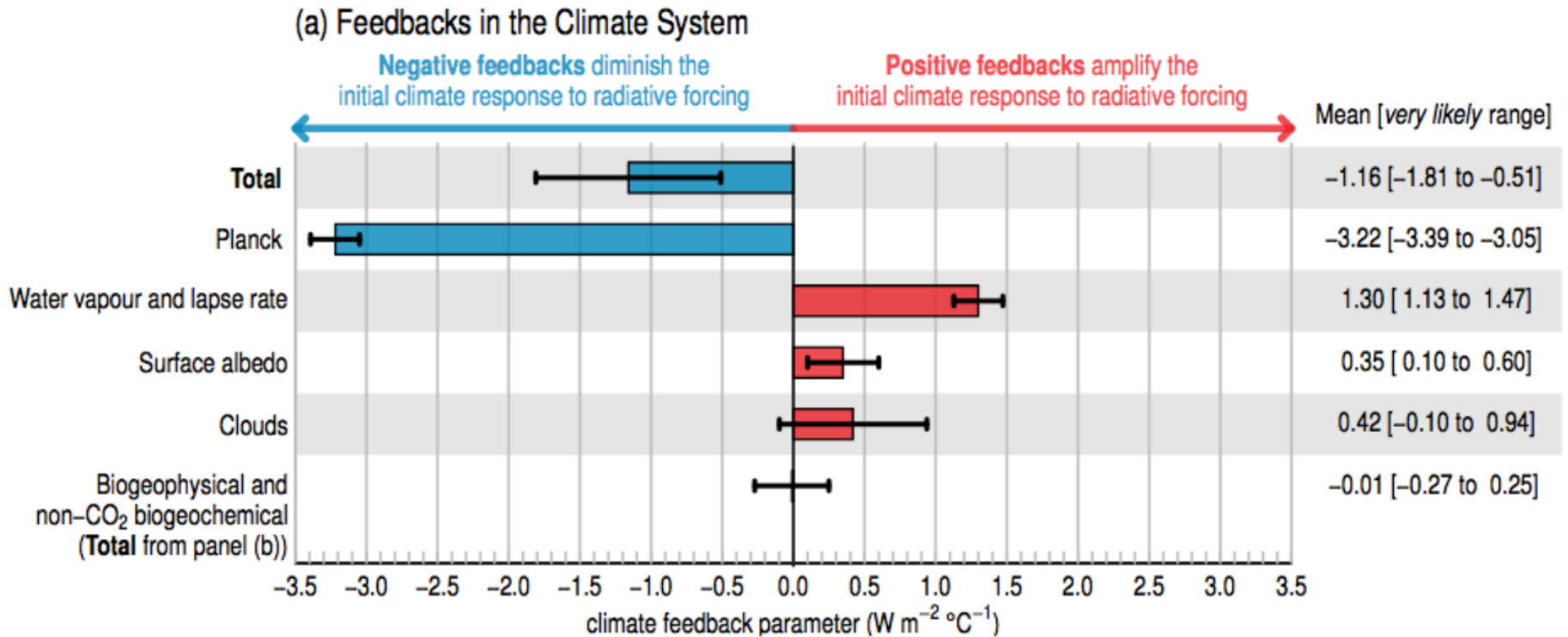
b) Equilibrium climate sensitivity (°C) assessed in AR6 and simulated by CMIP6 ESMs



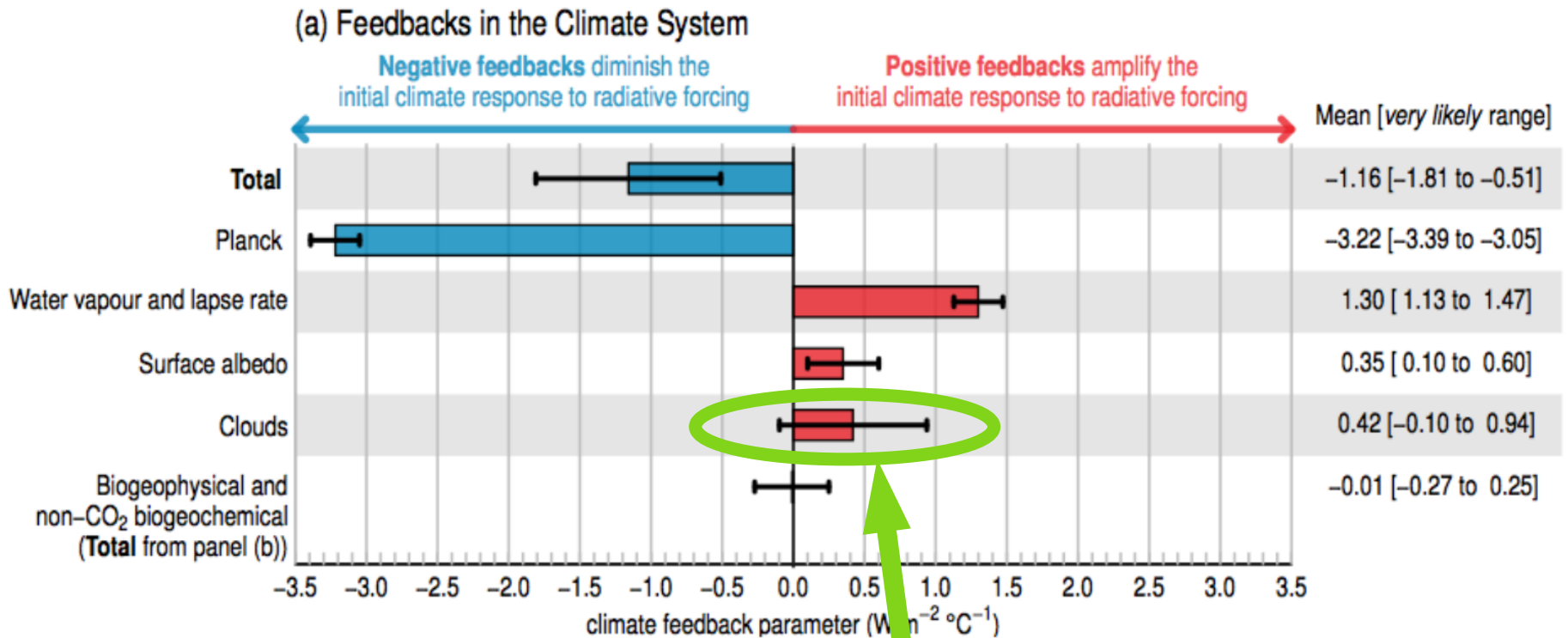
c) Transient climate response (°C) assessed in AR6 and simulated by CMIP6 ESMs



## Обратные связи в современных моделях климата [IPCC WG1 AR6, рис. TS.17a]



## Обратные связи в современных моделях климата [IPCC WG1 AR6, рис. TS.17a]



наибольшая неопределённость



# Причины изменений климата в XX

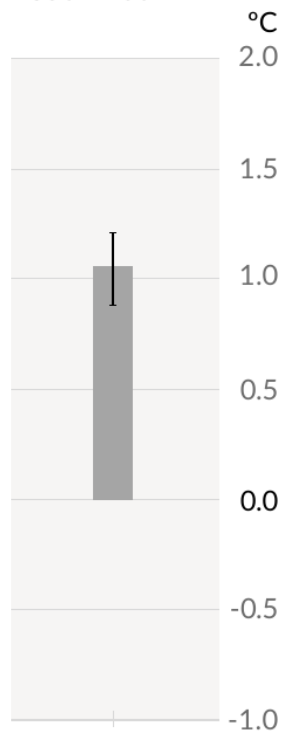
веке [IPCC WG1 AR6, рис. SPM.1 и

результаты атрибуции

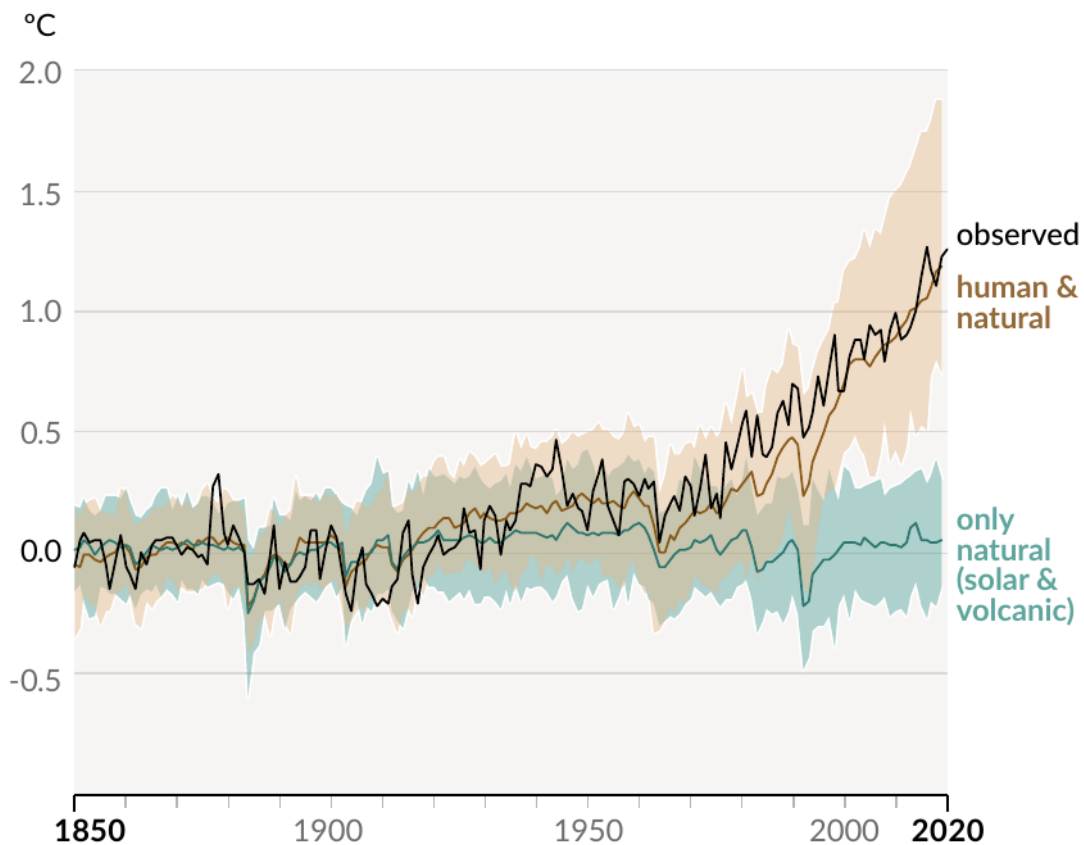
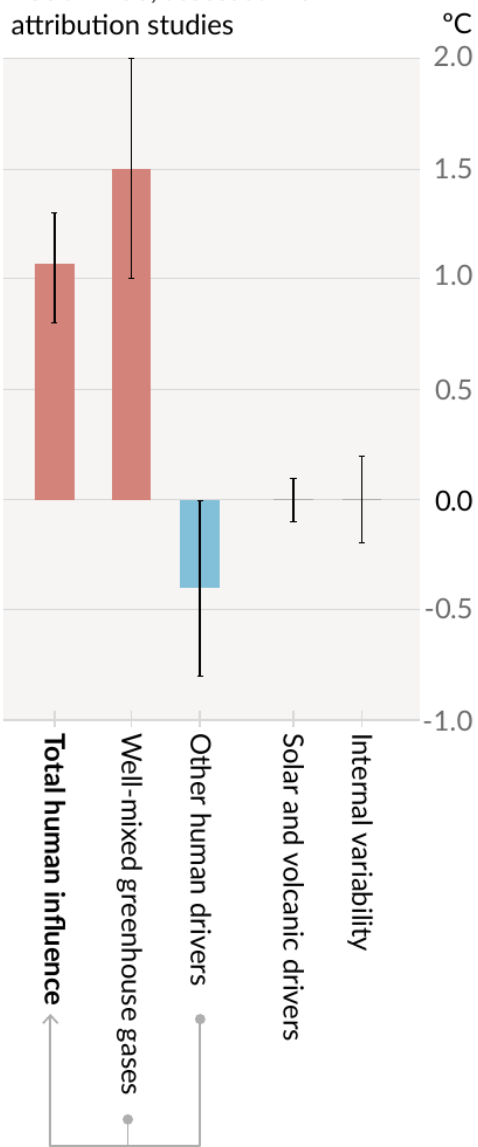
SPM.2]

расчёты с моделями CMIP6

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900



b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies



# Причины изменений климата в XX

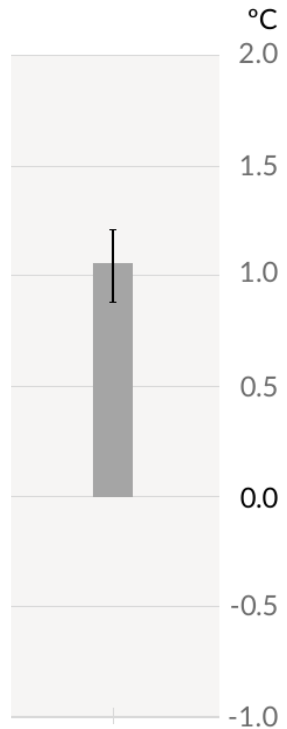
веке [IPCC WG1 AR6, рис. SPM.1 и

результаты атрибуции

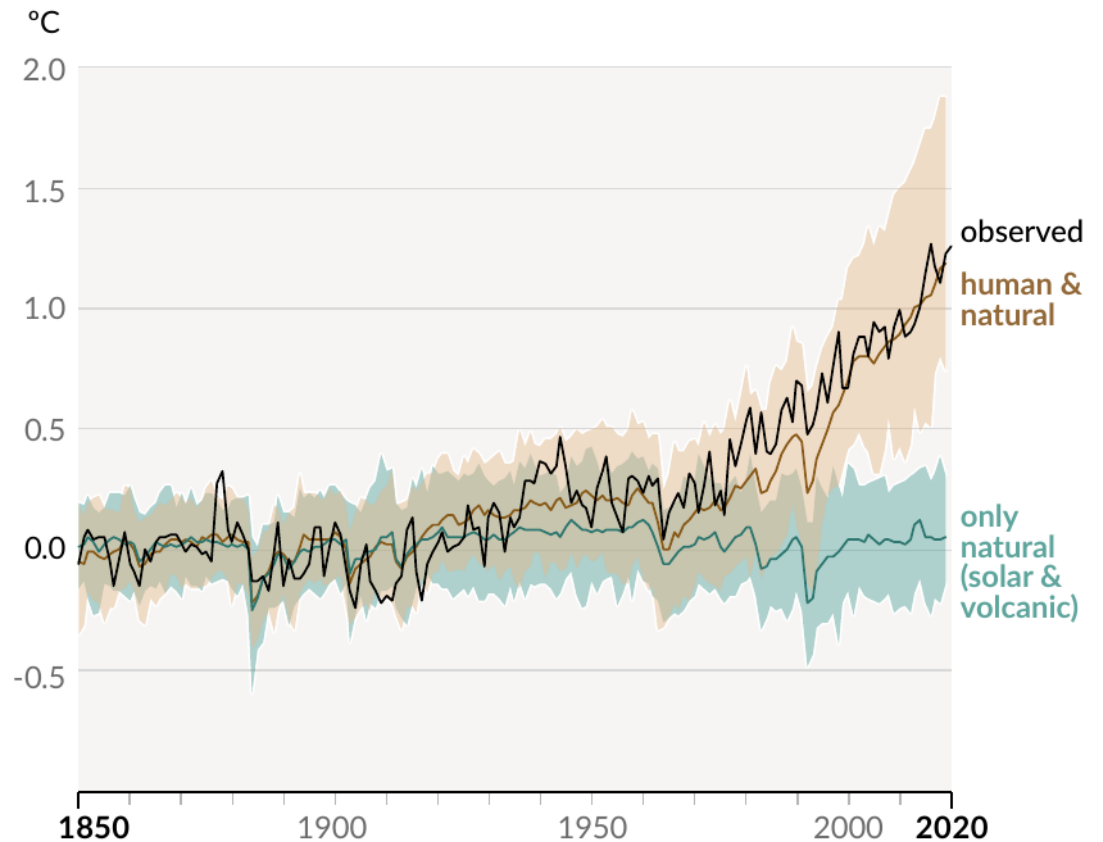
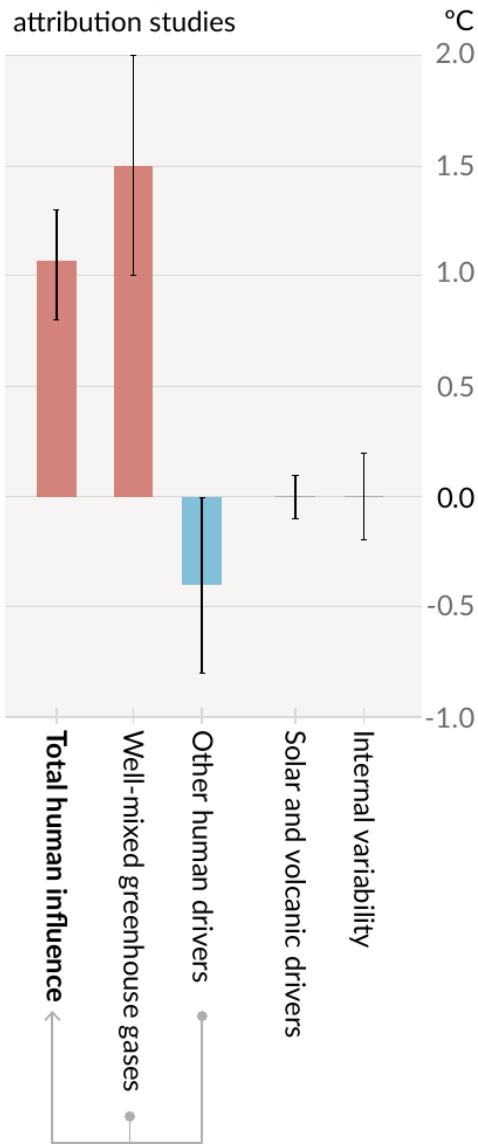
SPM.2]

расчёты с моделями CMIP6

a) Observed warming 2010-2019 relative to 1850-1900



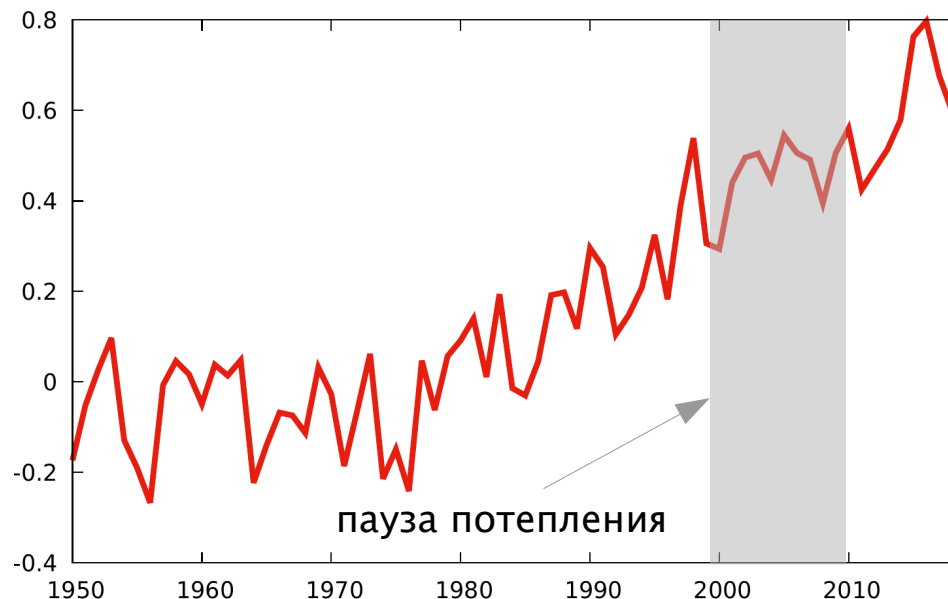
b) Aggregated contributions to 2010-2019 warming relative to 1850-1900, assessed from attribution studies



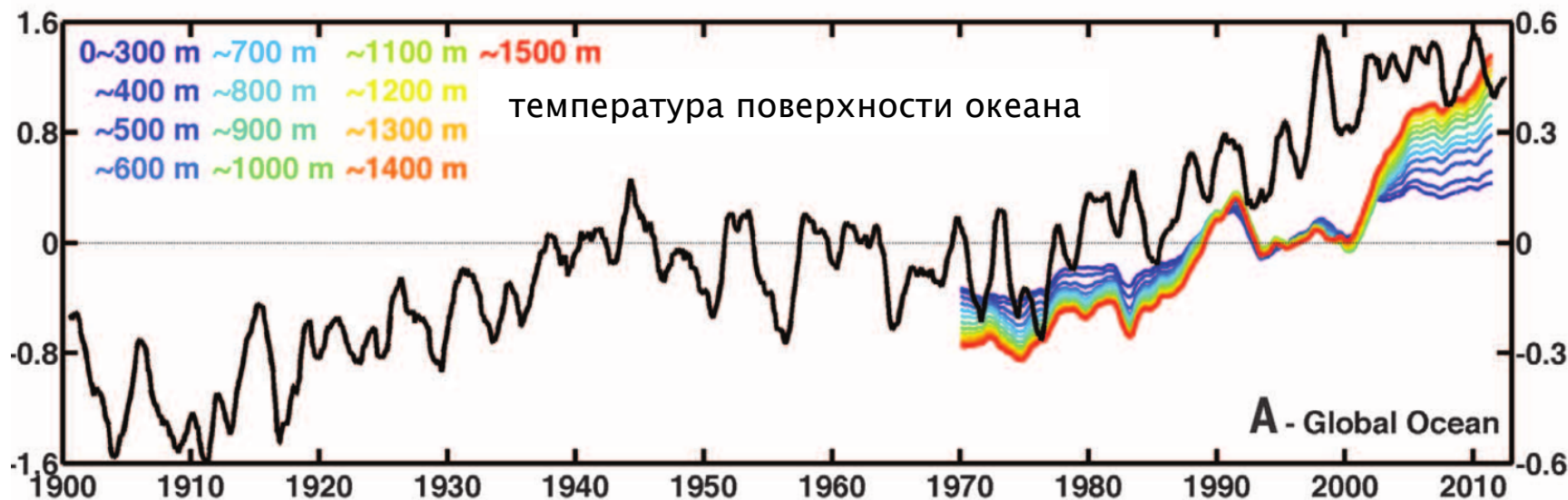
**Основной вклад – антропогенное парниковое воздействие**

## Пауза потепления 2000–х гг.

Изменение приземной температуры, осреднённой по году и по глобусу, по данным центра Хэдли (Великобритания), версия 4, °C



Изменение теплосодержания океана,  $10^{23}$  Дж [Chen, Tung, 2014]



Причина: более эффективное поглощение тепла океаном (влияние циркуляции океана)

# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

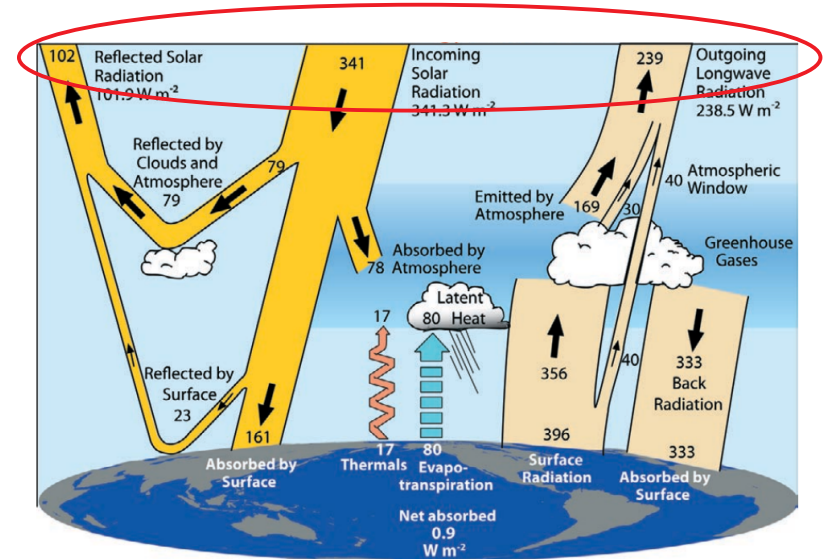
## Часть II

- **Линейный отклик Земной системы**
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

# Баланс энергии в ЗКС и линейный отклик

$$\underbrace{dH / dt}_{\text{Энтальпия}} = \underbrace{R}_{\text{РВВ}} + \underbrace{F}_{\text{обратные связи}}$$



# Баланс энергии в ЗКС и линейный отклик

$$\underbrace{dH / dt}_{\text{Энтальпия}} = \underbrace{R}_{\text{РВВ}} + \underbrace{F}_{\text{обратные связи}} = -\lambda T$$

Энтальпия  
=  $C dT/dt$

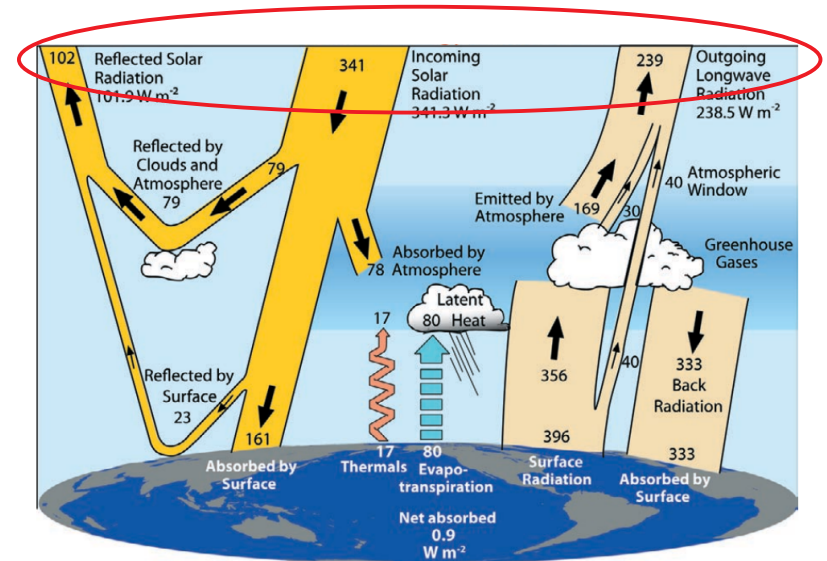
РВВ

обратные связи  
=  $-\lambda T$

$T$  – среднеглобальная приземная температура

$C = \text{const}$

$\lambda = \text{const}$



## Баланс энергии в ЗКС и линейный отклик

$$\underbrace{dH / dt}_{\text{энтальпия}} = \underbrace{R}_{\text{РВВ}} + \underbrace{F}_{\text{обратные связи}}$$

$$= C dT / dt = - \lambda T$$

$T$  – среднеглобальная приземная температура

$C = \text{const}$

$\lambda = \text{const}$



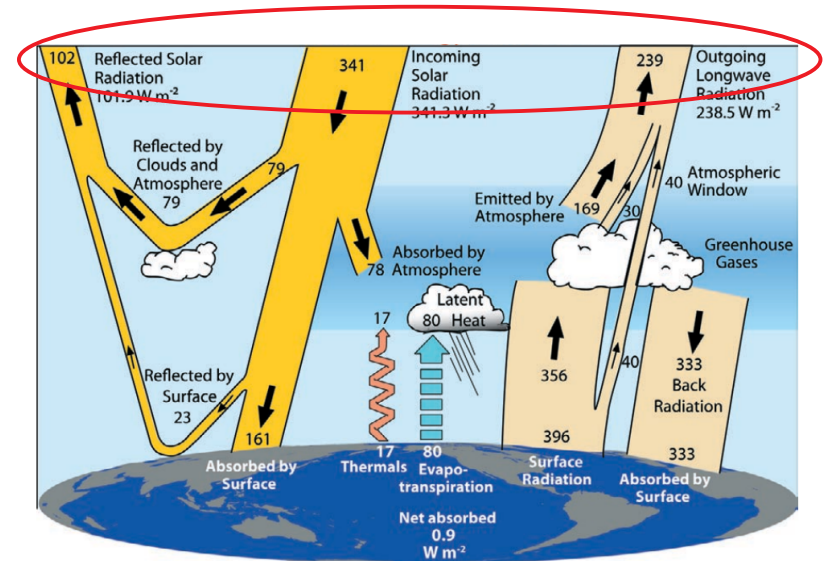
$$C dT / dt = R - \lambda T$$

В новом положении равновесия

$$T = R / \lambda;$$

$\lambda$  – параметр климатической чувствительности  
(модели CMIP6:  $\lambda = 1.03 \pm 0.36 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ ;) )

$\lambda$  лишь слабо зависит от природы РВВ и его пространственной локализации  
⇒ отклик почти линеен



# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы



# Уходящая длинноволновая радиация: приближение чёрного тела и формула Будыко

Приближение абсолютно чёрного тела (АЧТ)

$$OLR = \sigma T^4$$

(соответствует температуре излучения 255 К  
 ⇒ высота излучения ~ 5 км)

Эмпирическая формула М.И. Будыко

$$OLR = A + B T$$

$$B = 1.8-2.2 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$$

Линеаризация приближения АЧТ

$$d OLR / dT = 4 \sigma T^3 = 3.7 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1} \neq B$$

Уточнённое приближение АЧТ

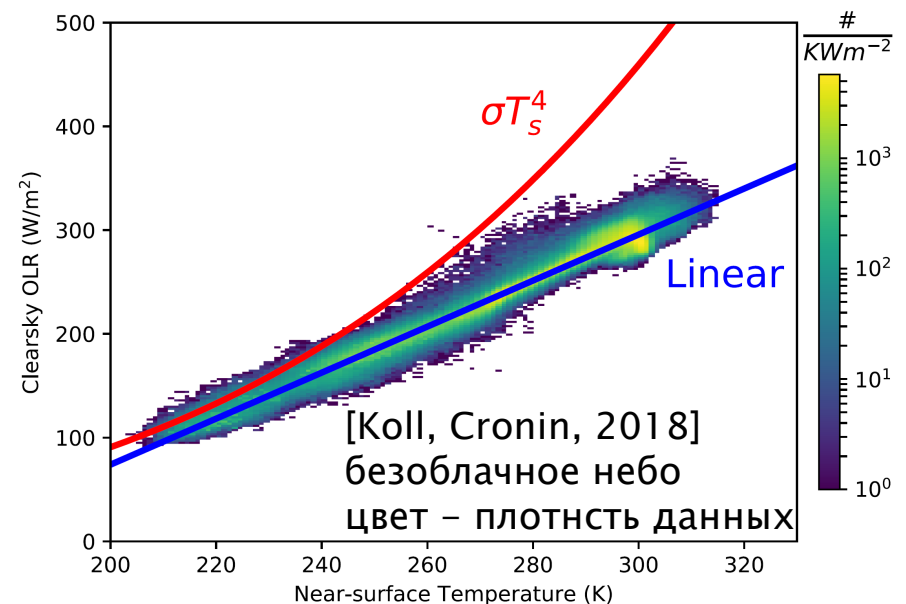
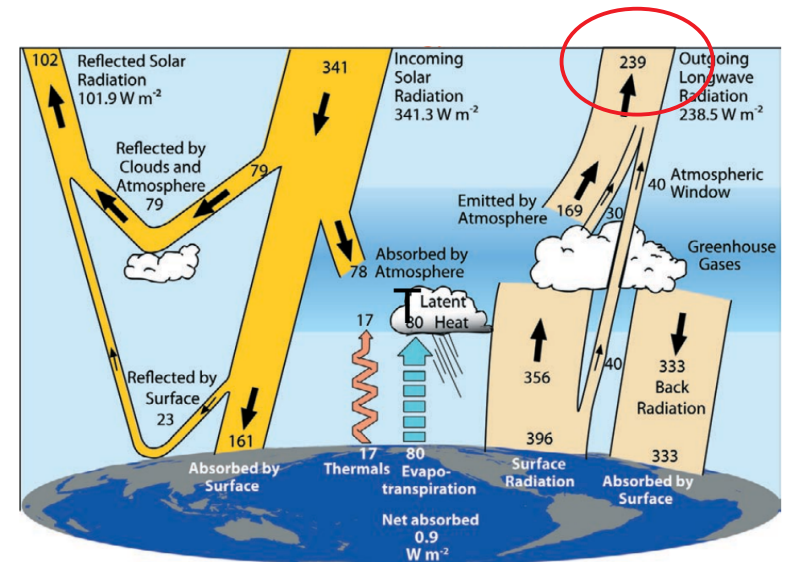
$$OLR = \epsilon \sigma T^4$$

$\epsilon$  – степень черноты

$$\epsilon \approx 1$$

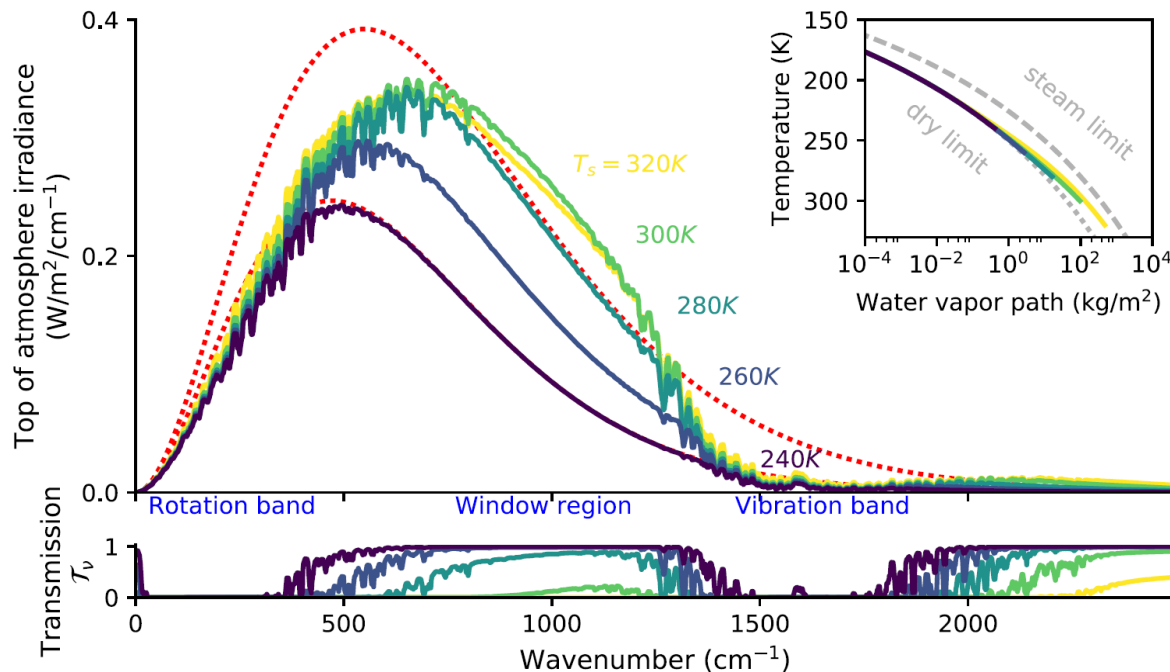
$$d\epsilon / dT < 0;$$

$$d\epsilon / dT \sim \epsilon / T$$



# Уходящая длинноволновая радиация. Насыщенная водяным паром безоблачная атмосфера [Koll, Cronin, 2018]

Расчёты с полилинейной моделью переноса радиации в атмосфере



Водяной пар: при RH=100% и отсутствии других парниковых составляющих

$$M_{wv} = M_{wv}(T)$$

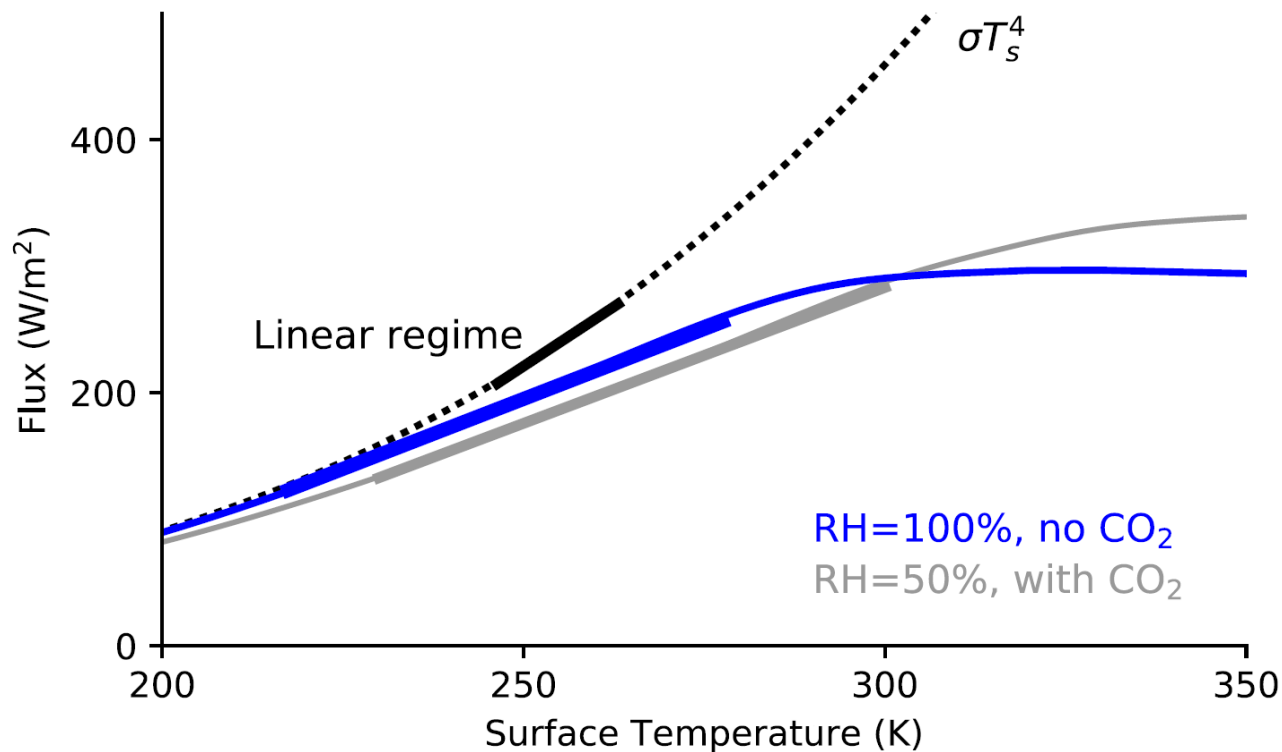
(примерно экспоненциальный рост)

Ширина спектрального окна пропускания уменьшается при потеплении  
⇒ компенсация быстрого роста T<sup>4</sup>

## Уходящая длинноволновая радиация. Ненасыщенная влагой безоблачная атмосфера и влияние CO<sub>2</sub> [Koll, Cronin, 2018] (1)

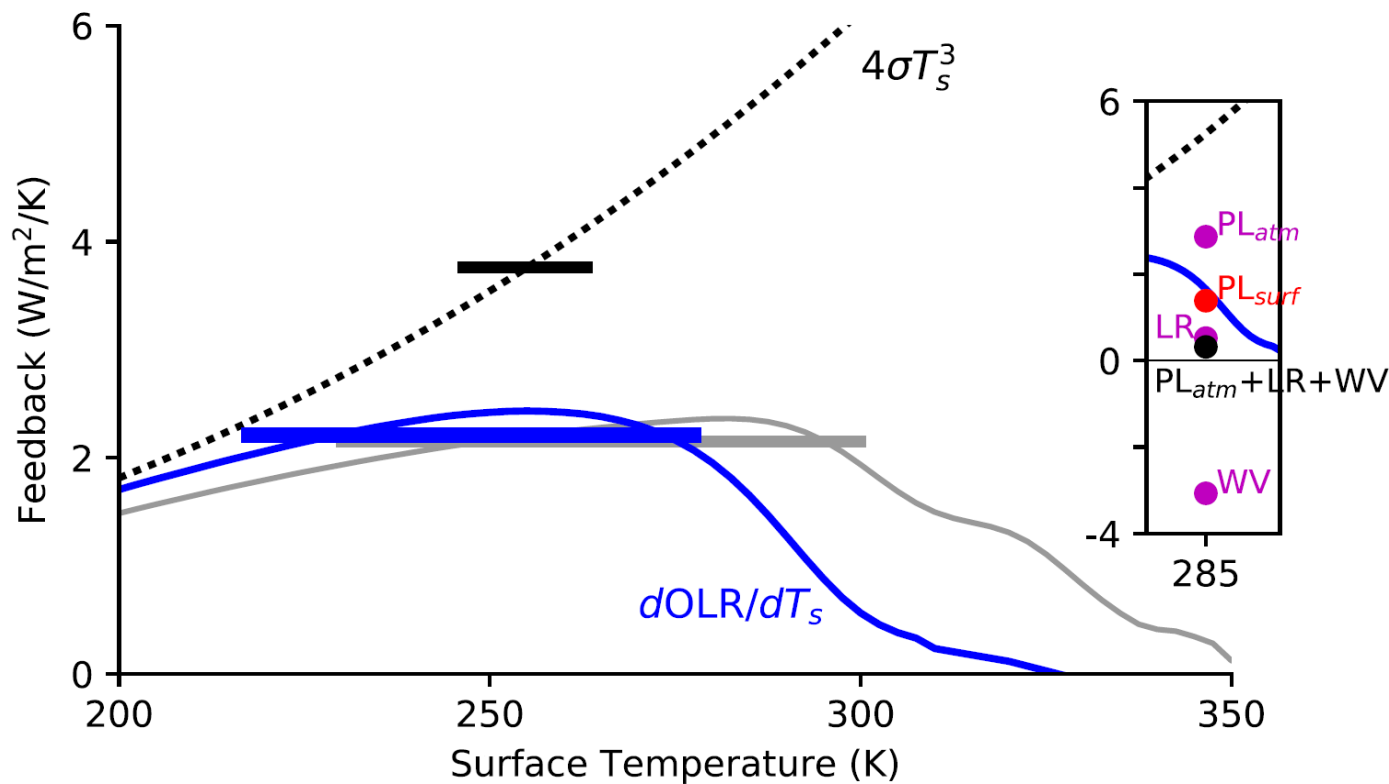
RH < 100% ⇒ замедление закрытия спектрального окна прозрачности при потеплении (нелинейность усиливается)

добавление  $q_{\text{CO}_2} = 300 \text{ млн}^{-1}$ : из-за наличия высоты излучения  $h_{\text{em}}$   
 $d \text{ OLR} / dT = 4 \sigma T^3 + f(q_{\text{CO}_2}, h_{\text{em}})$   
 ⇒ линейность восстанавливается



## Уходящая длинноволновая радиация. Влияние слоёв атмосферы [Koll, Cronin, 2018]

Взаимная компенсация нелинейных зависимостей излучения атмосферы от её температуры, оптической толщины водяного пара  
(справедливо и для атмосферы с облаками [Мохов, Петухов, 1975])



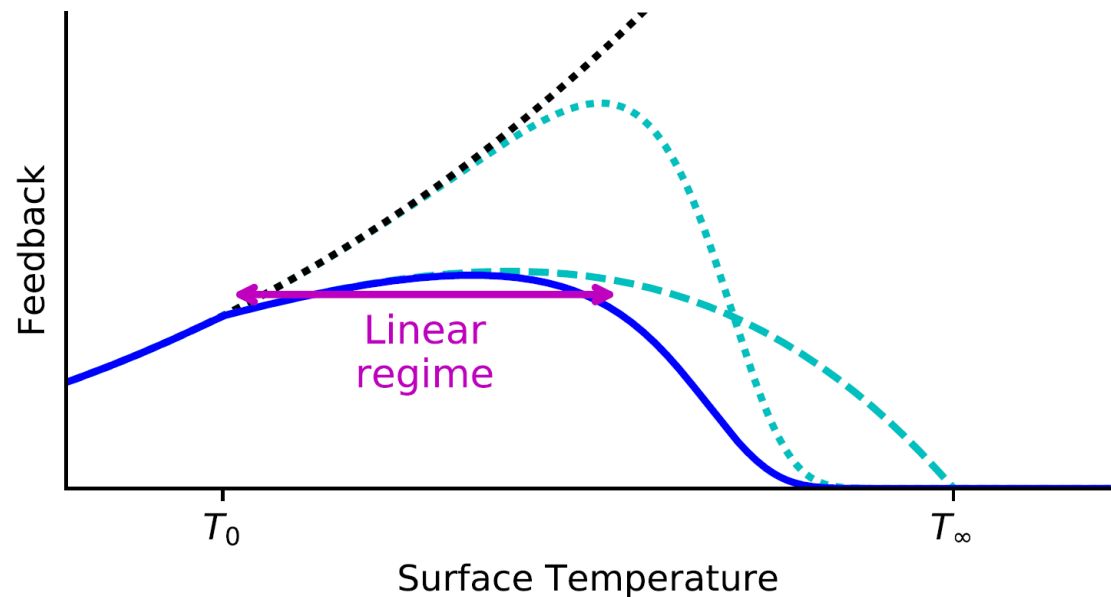
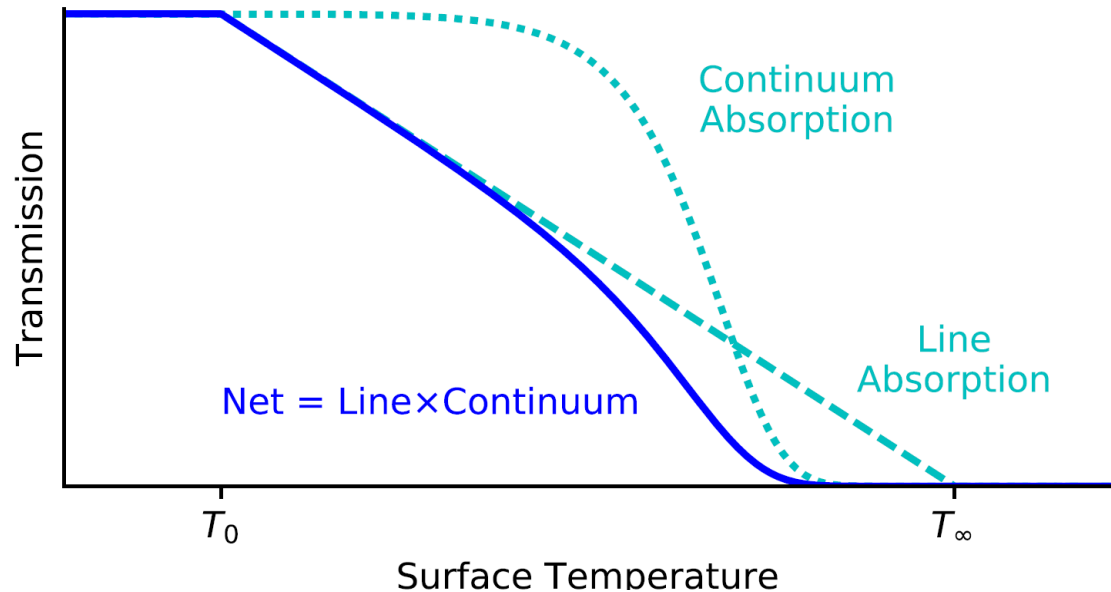
- $PL_{atm}$  - однородное по высоте изменение температуры атмосферы
- $PL_{surf}$  - изменение температуры поверхности Земли
- $LR$  - изменение вертикального градиента температуры
- $WV$  - изменение массы водяного пара

# Уходящая длинноволновая радиация. Влияние континуального поглощения водяным паром [Koll, Cronin, 2018]

Дополнительно ускоряет закрытие спектрального окна прозрачности при потеплении



Линейный режим расширяется



# План

## Часть I

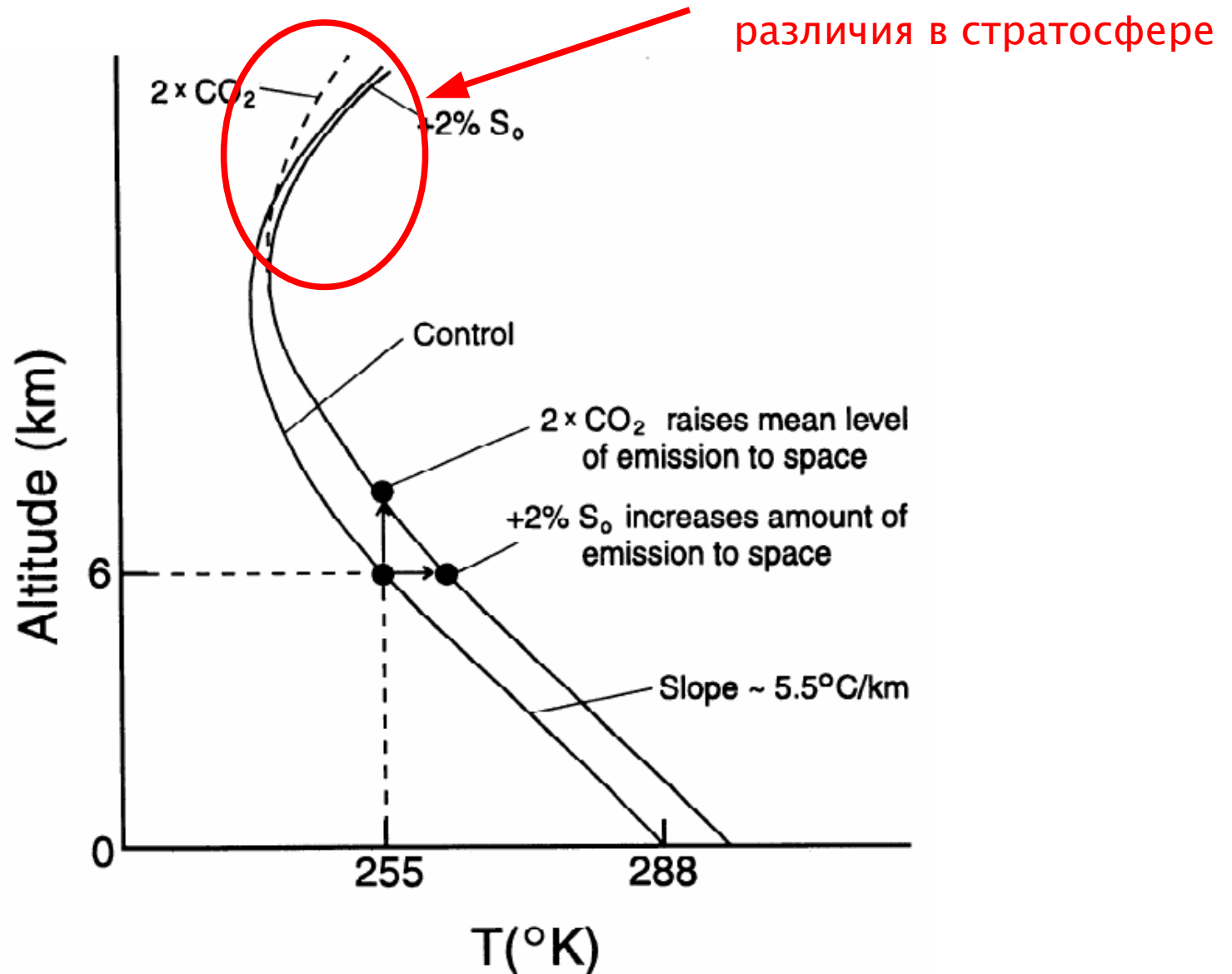
- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

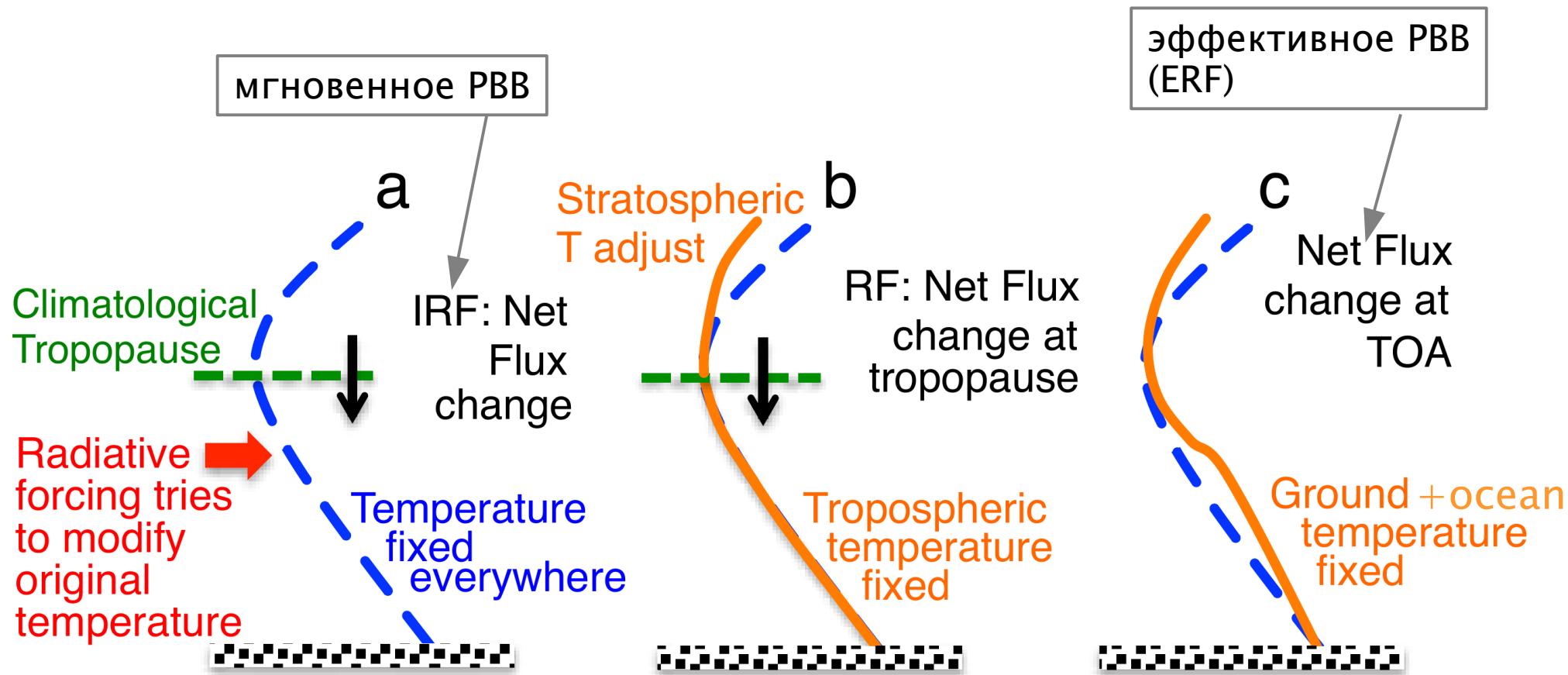
- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- **Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии**
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

# Различие отклика на РВВ одинаковой абсолютной величины, но разной природы [Hansen et al., 1997]



# Радиационный форсинг (радиационное возмущающее воздействие): различие определений [IPCC WG1 AR5, рис. 8.1]

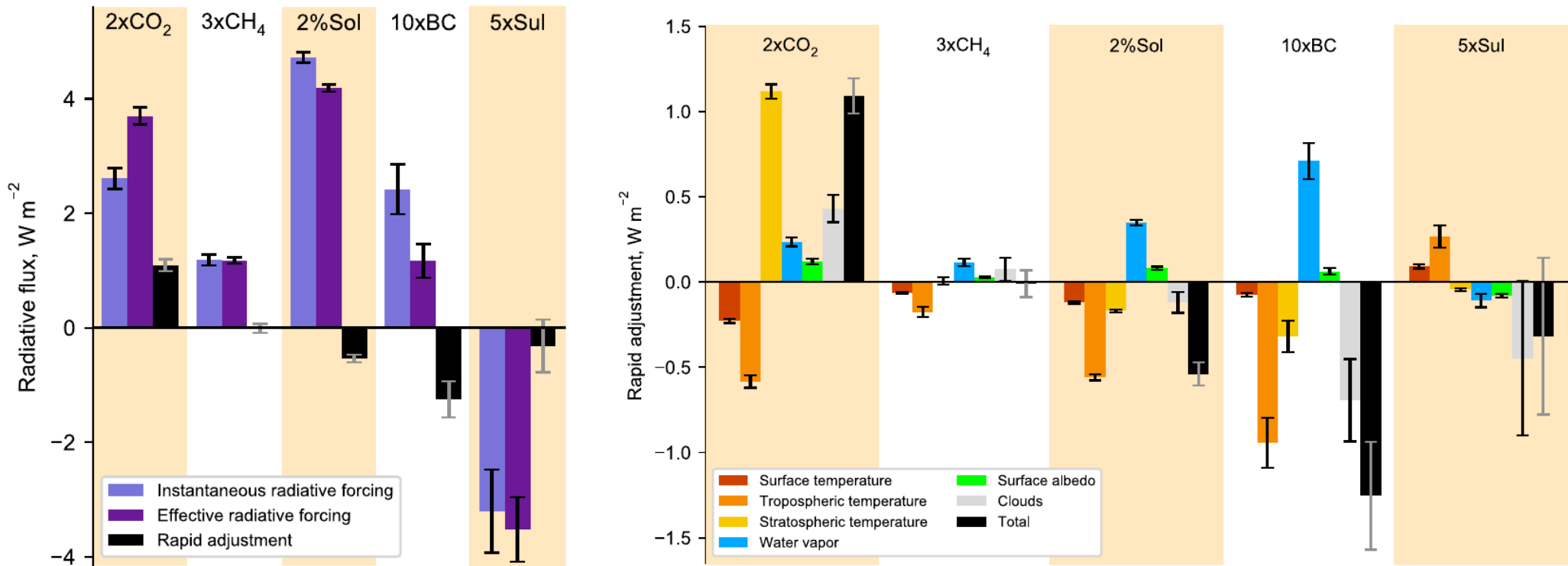


Эффективное PBB (ERF) лучше описывает изменения климата

Для тропосферы разделение между "подстройкой" и "обратными связями" нечёткое

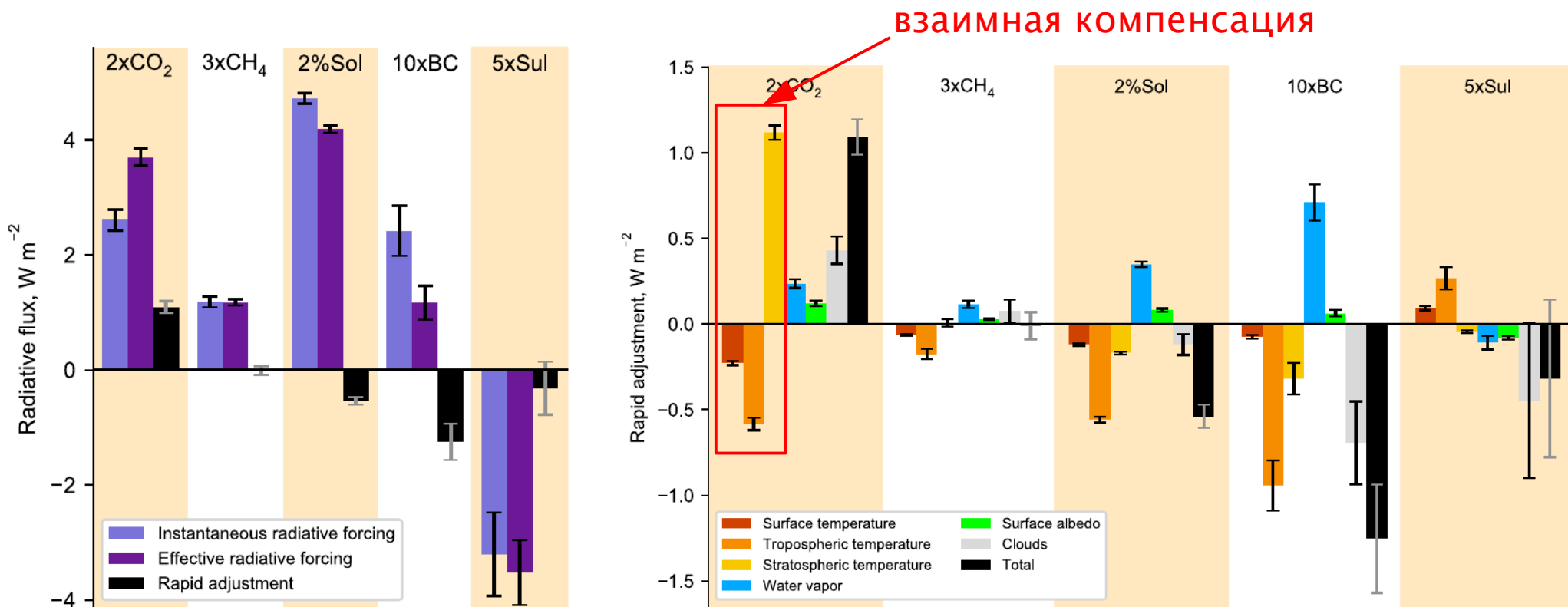


# Быстрая подстройка состояния климата к РВВ, модели CMIP6 [Smith et al., 2018]



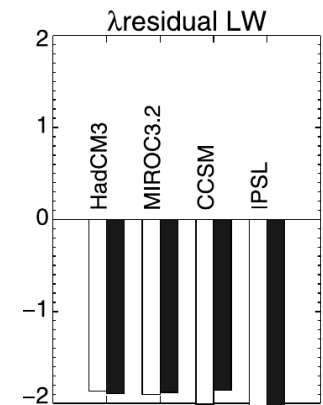
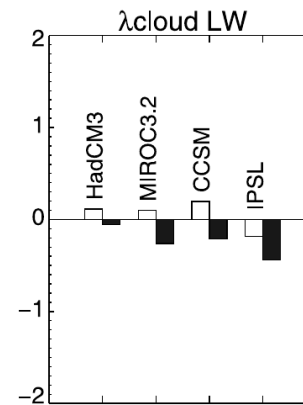
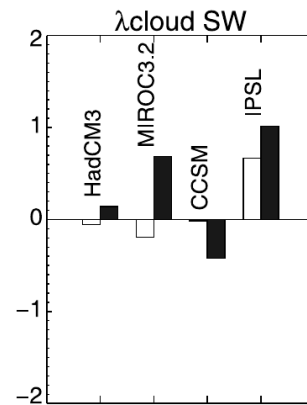
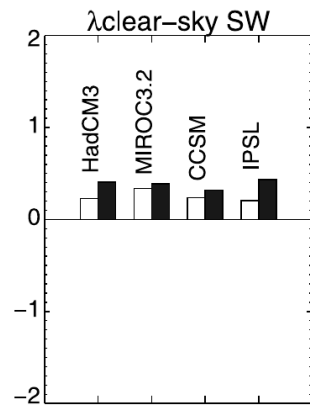
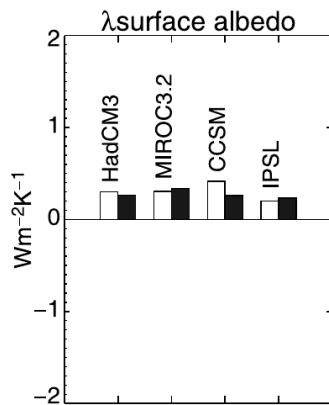
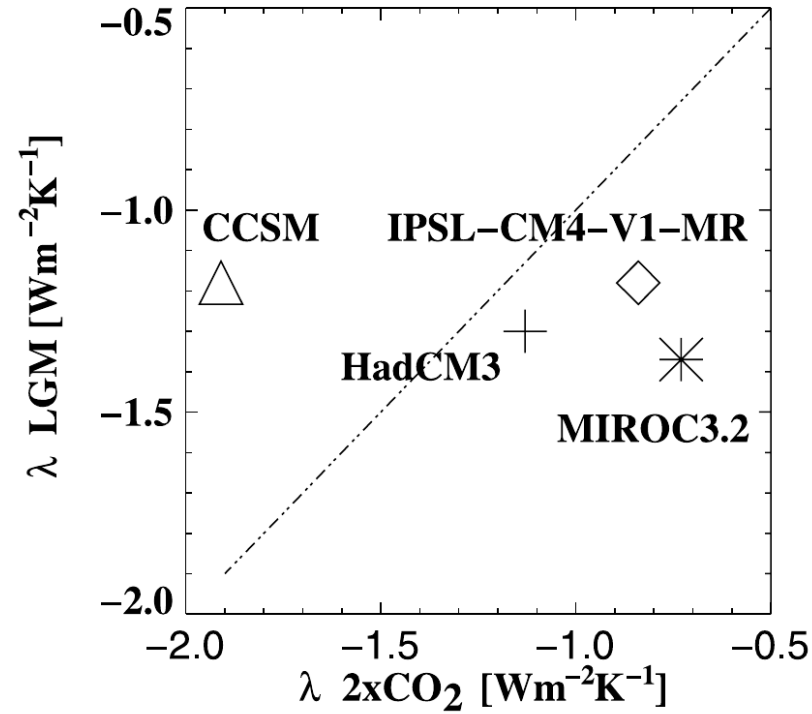
- Основной вклад – температура тропосферы (с частичной компенсацией водяным паром) и облачность;
- Подстройка облачности существенно зависит от модели; для других процессов модели достаточно хорошо согласуются между собой

# Быстрая подстройка состояния климата к РВВ, модели CMIP6 [Smith et al., 2018]



- Основной вклад – температура тропосферы (с частичной компенсацией водяным паром) и облачность;
- Подстройка облачности существенно зависит от модели; для других процессов модели достаточно хорошо согласуются между собой

# Зависимость параметра климатической чувствительности от состояния климата [Crucifix, 2006]



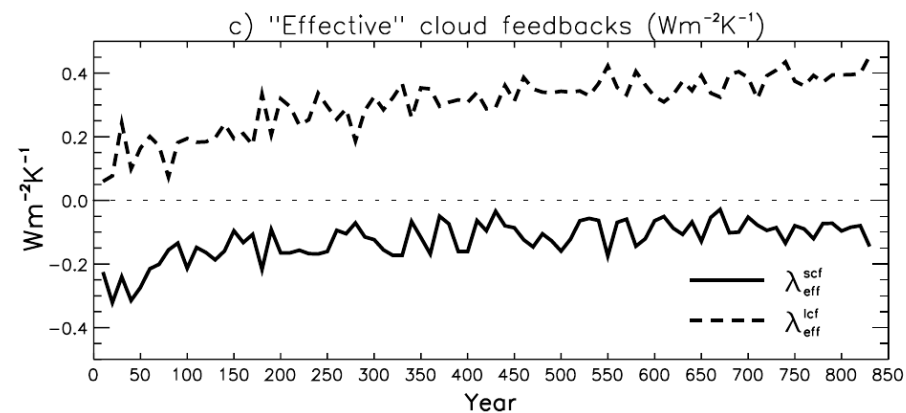
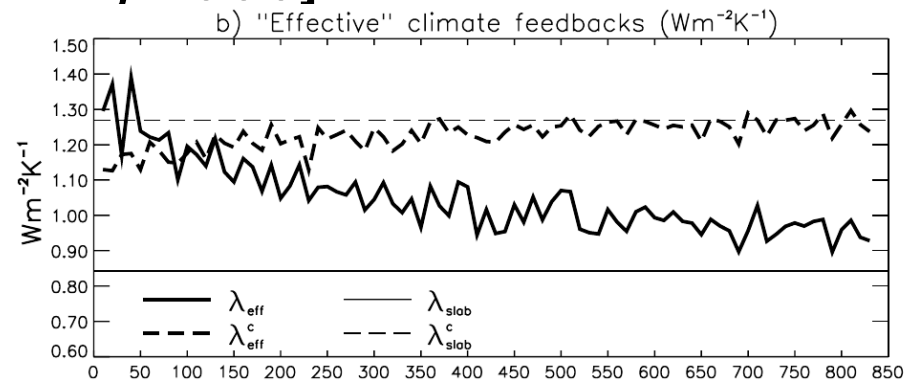
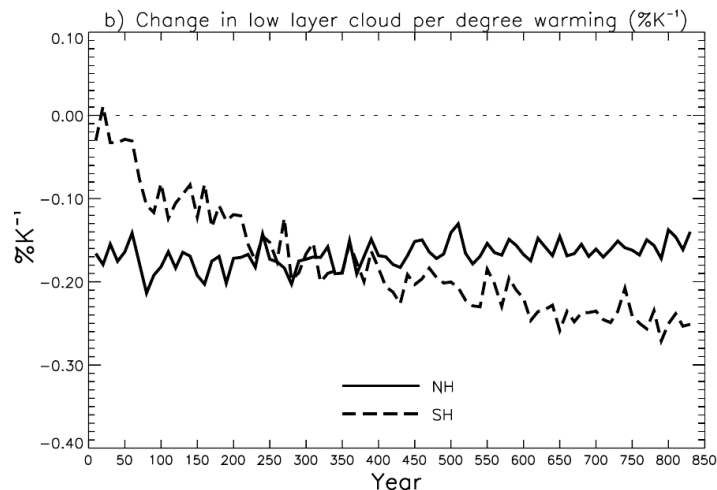
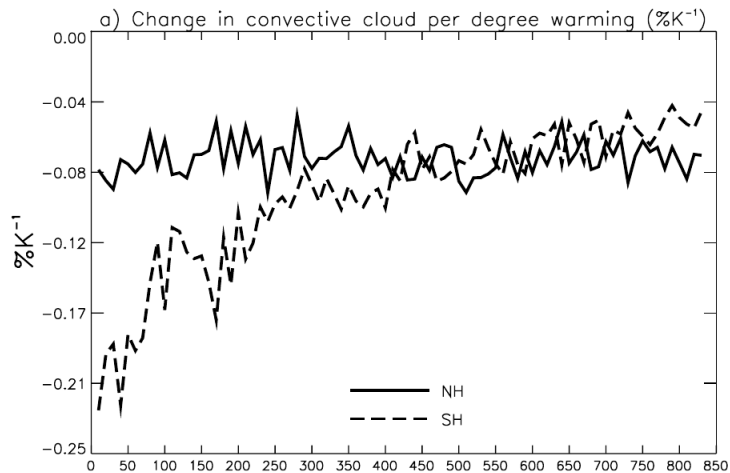
# Зависимость параметра климатической чувствительности от времени [Senior, Mitchell, 2000]

HadAM2 + slab-океан;  
эксперимент на удвоение содержания  
CO2 в атмосфере;

$$\lambda_{eff} = \frac{G_0 - \Delta(Q - F)_t}{\Delta T_t}$$

$G_0$  – РВВ

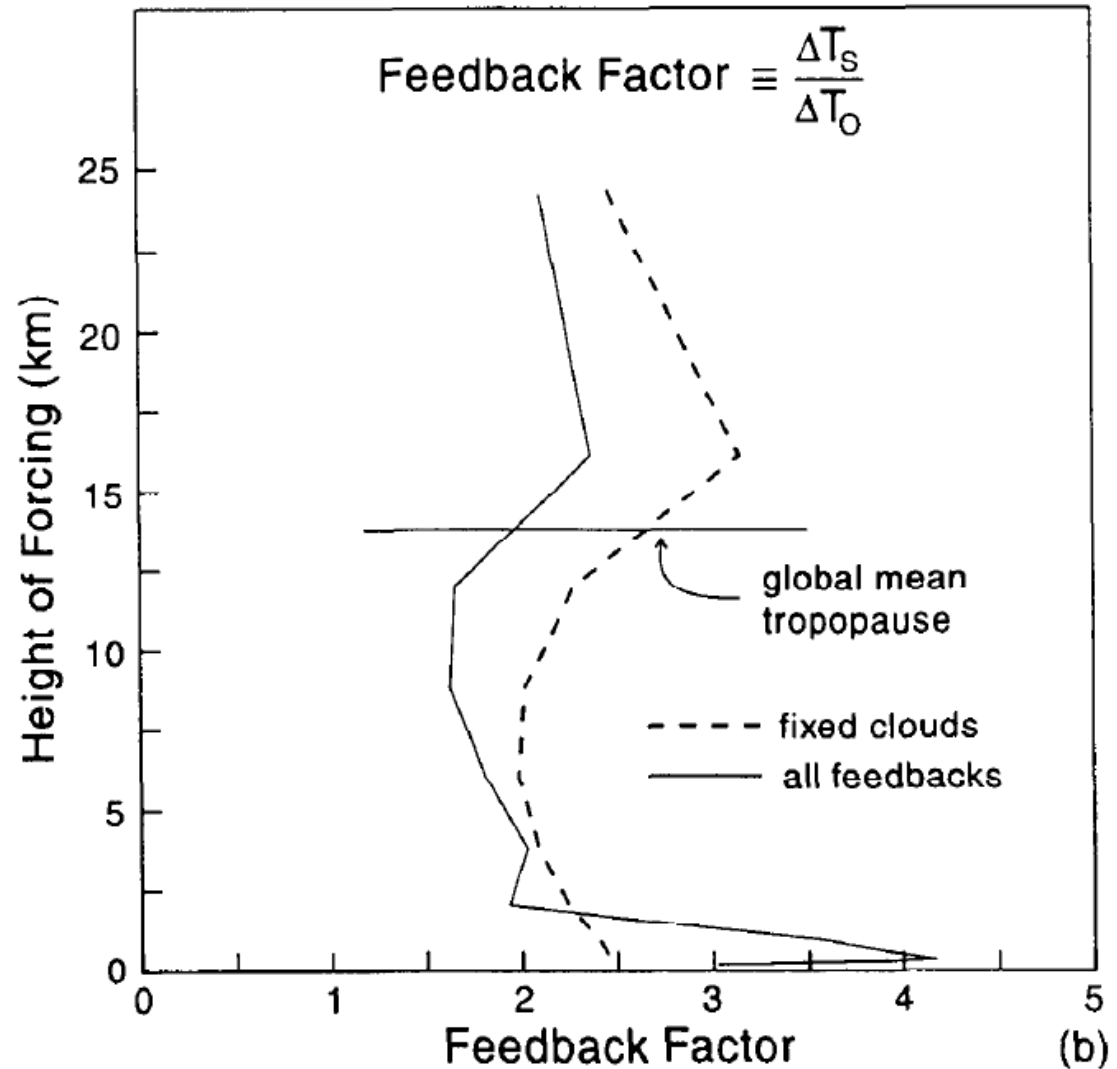
$\Delta(Q - F)_t$  – радиационный баланс на  
верхней границе атмосферы



# Зависимость $\lambda$ от высоты приложения РВВ [Hansen et al., 1997]

Эксперименты с МОЦ GISS с заданием искусственного РВВ на различных высотах

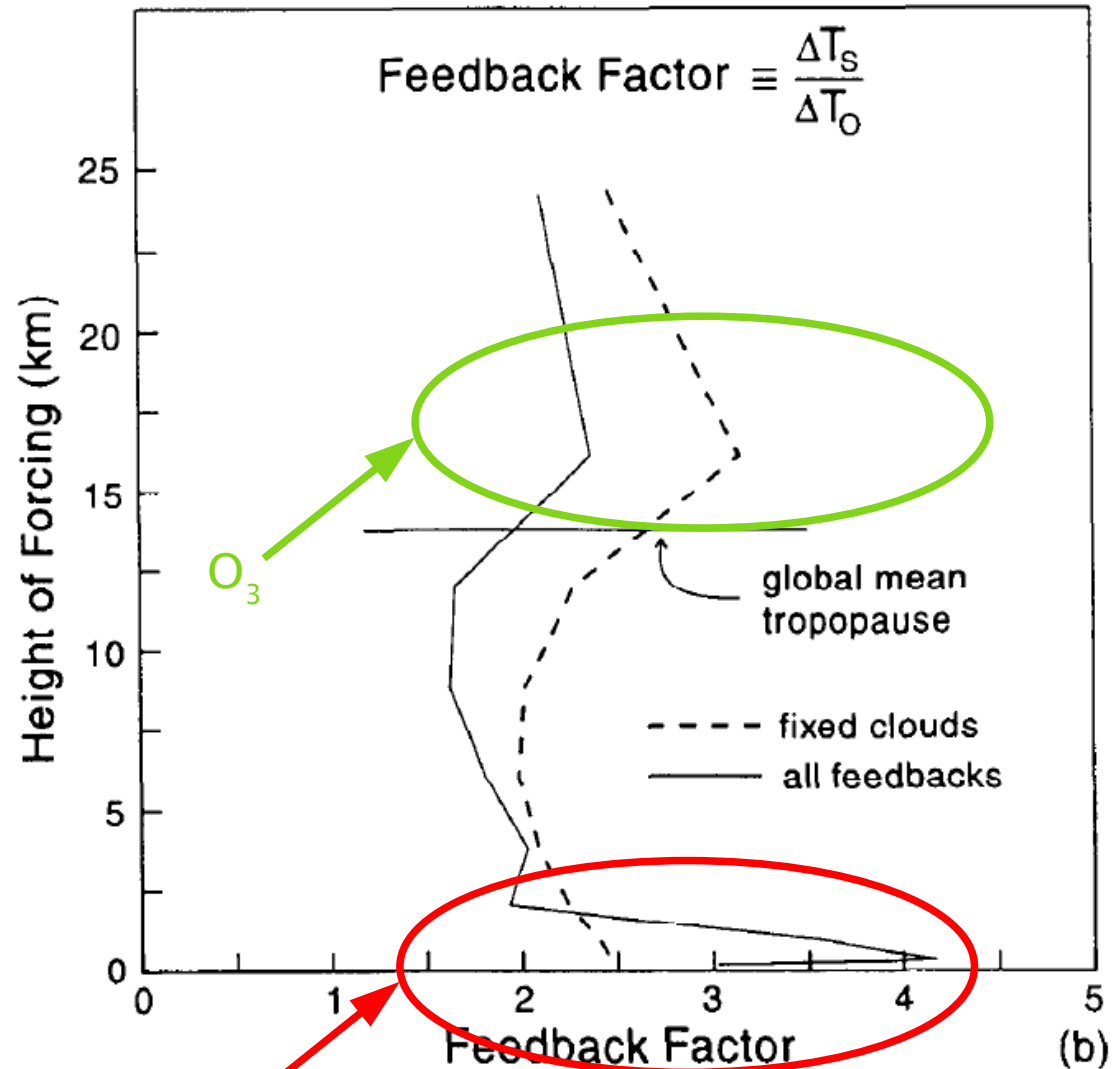
$\Delta T_s$  – полный отклик модели  
 $\Delta T_o$  – "планковский" отклик (без обратных связей)



# Зависимость $\lambda$ от высоты приложения РВВ [Hansen et al., 1997]

Эксперименты с МОЦ GISS с заданием искусственного РВВ на различных высотах

$\Delta T_s$  – полный отклик модели  
 $\Delta T_o$  – "планковский" отклик (без обратных связей)

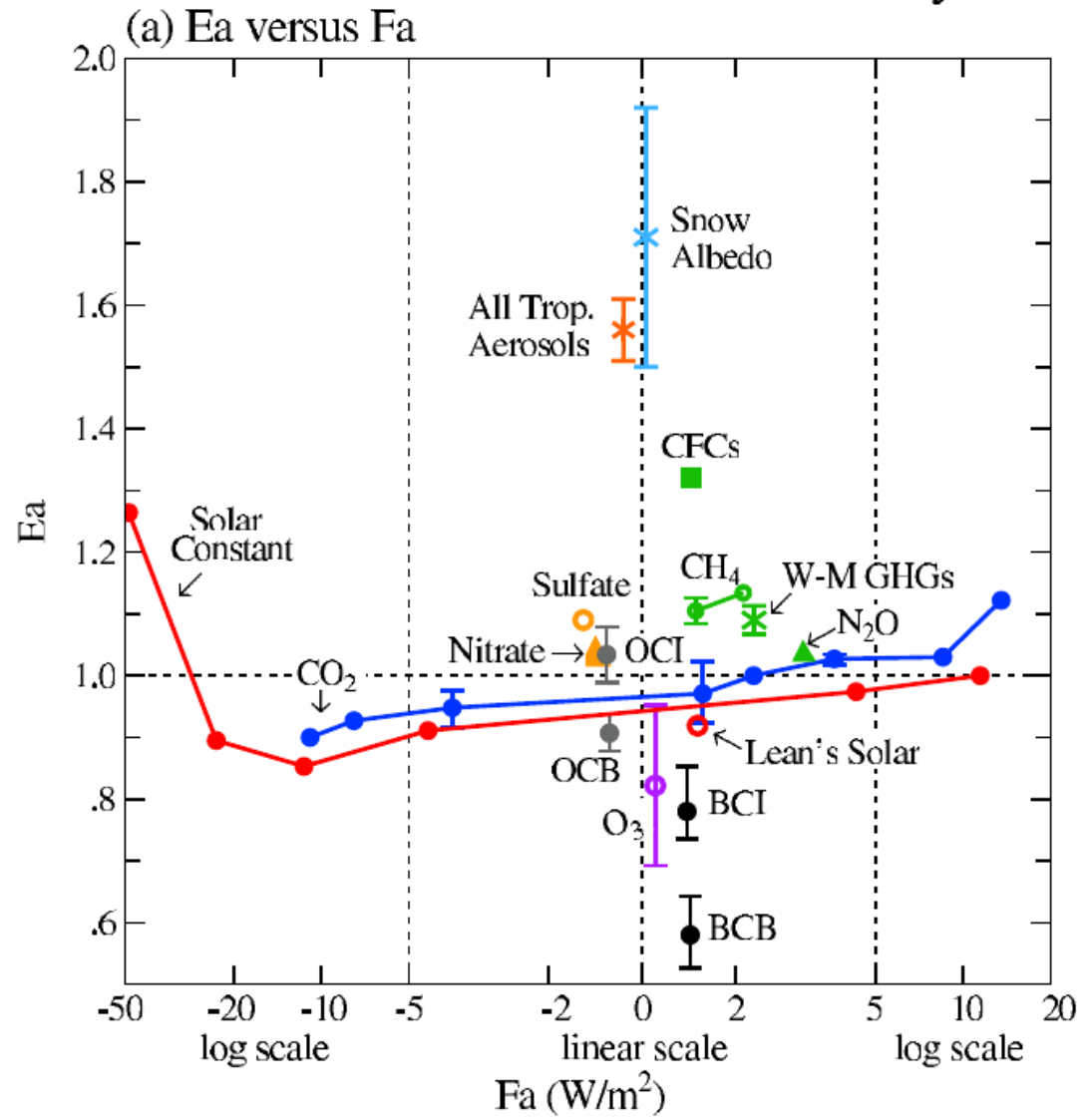


парниковые газы, аэрозоли, альbedo поверхности ...

# Эффективность РВВ [Hansen et al., 2005]

Для РВВ после подстройки стратосферы

$$E_a = \frac{(\Delta T_s / F_a)_X}{(\Delta T_s / F_a)_{1.5 \times \text{CO}_2}}$$



# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- **Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата**
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

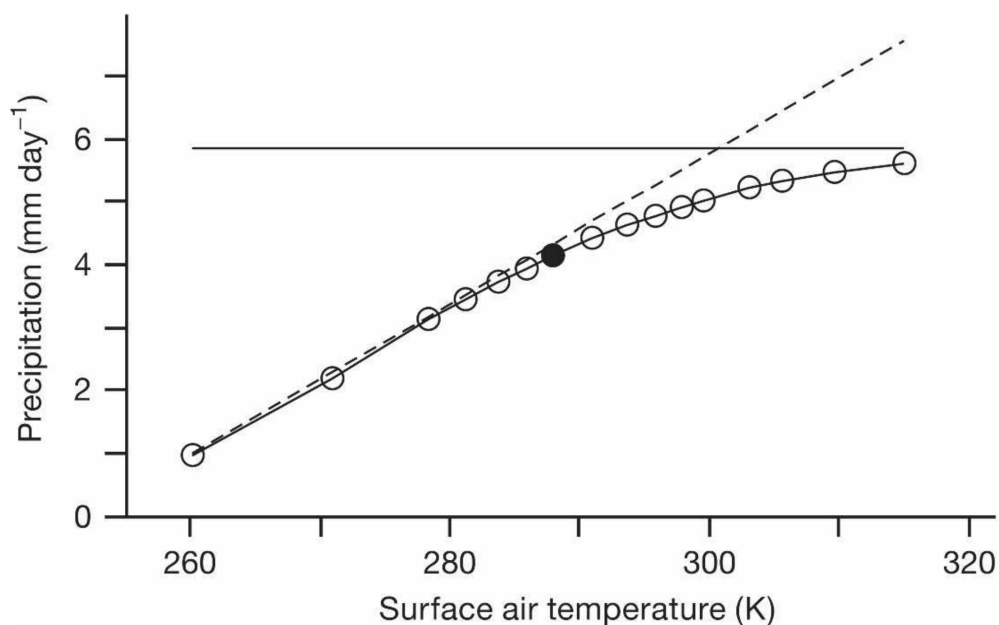


## Зависимость отклика характеристик гидрологического цикла на изменение температуры [O'Gorman, Schneider, 2008a]

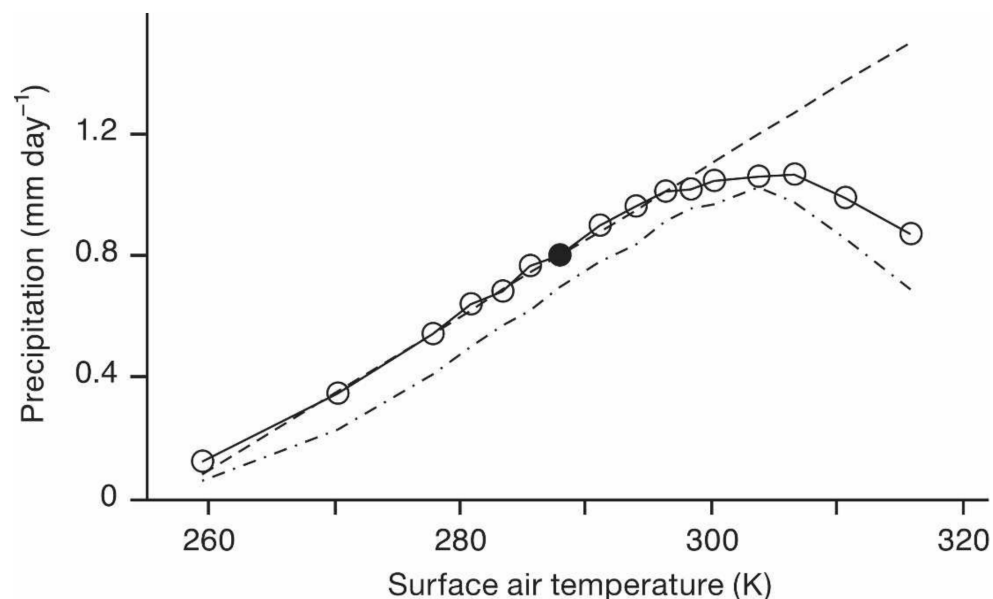
Эксперименты с идеализированной МОЦ

- масштабирование оптической толщины для длинноволновой радиации;
- перенос солнечной радиации с предписанной оптической толщиной и без годового хода;
- конвективное приспособление к влажной адиабате.

Полные осадки

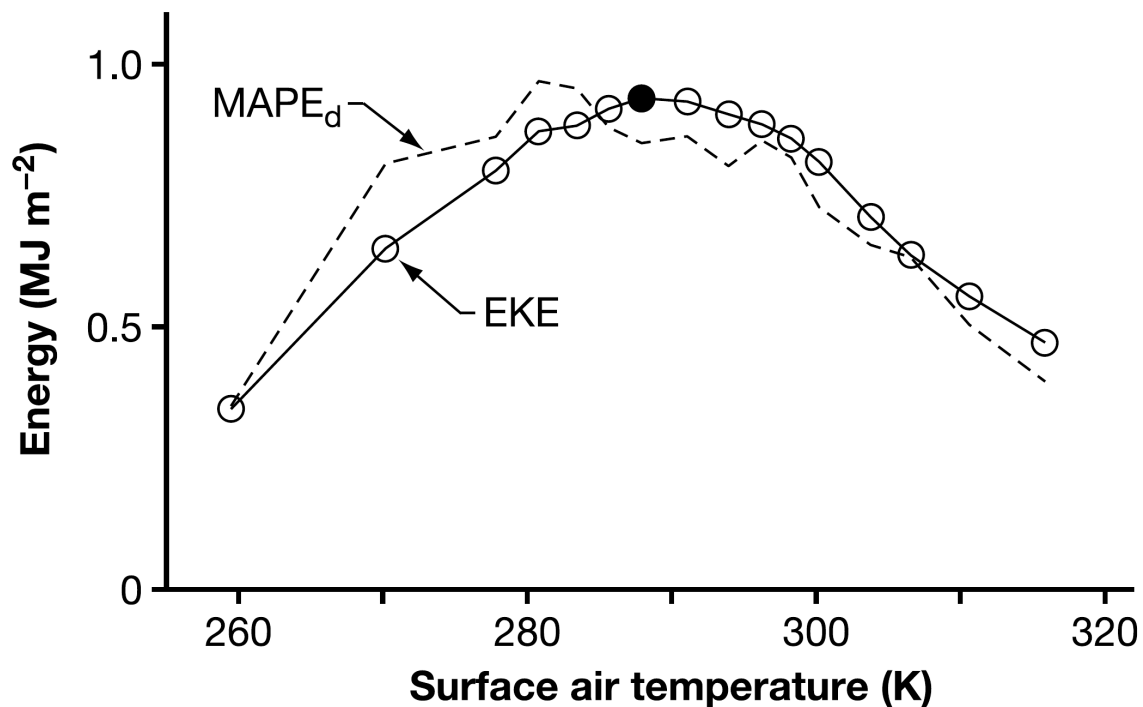


Крупномасштабные осадки



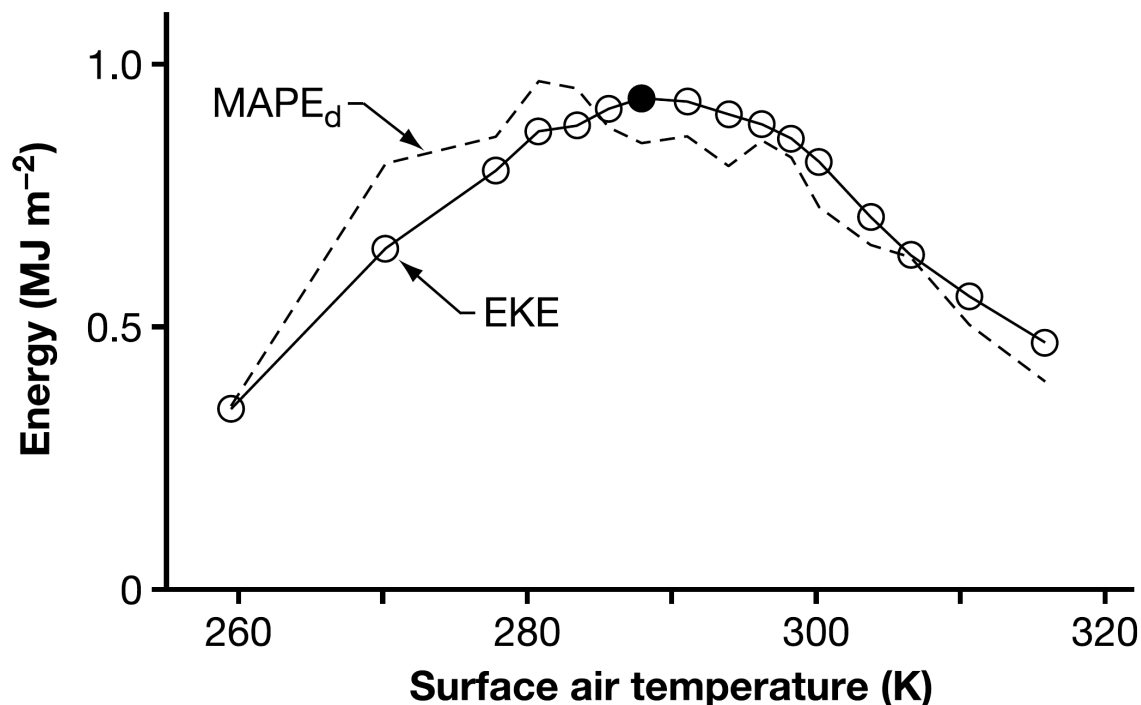
- Вблизи современного климата  
 $dP/dT \sim 2.5\%/K$
- При  $T \geq 310 K$  – выход на  
асимптотическое значение

## Зависимость отклика энергии синоптических вихрей на изменение температуры [O'Gorman, Schneider, 2008b]



MAPE<sub>d</sub> и EKE взаимно линейны, но обе характеризуются максимумом вблизи современного климата

## Зависимость отклика характеристик гидрологического цикла на изменение температуры [O'Gorman, Schneider, 2008b]



MAPE<sub>d</sub> и EKE взаимно линейны, но обе характеризуются максимумом вблизи современного климата

$$\text{MAPE}_d \approx \frac{c_p}{24 g} \Delta p_t L_Z^2 \Gamma (\partial_y \bar{\theta})^2$$

$$\Gamma = -\frac{\kappa}{p} (\partial_p \bar{\theta})^{-1}$$

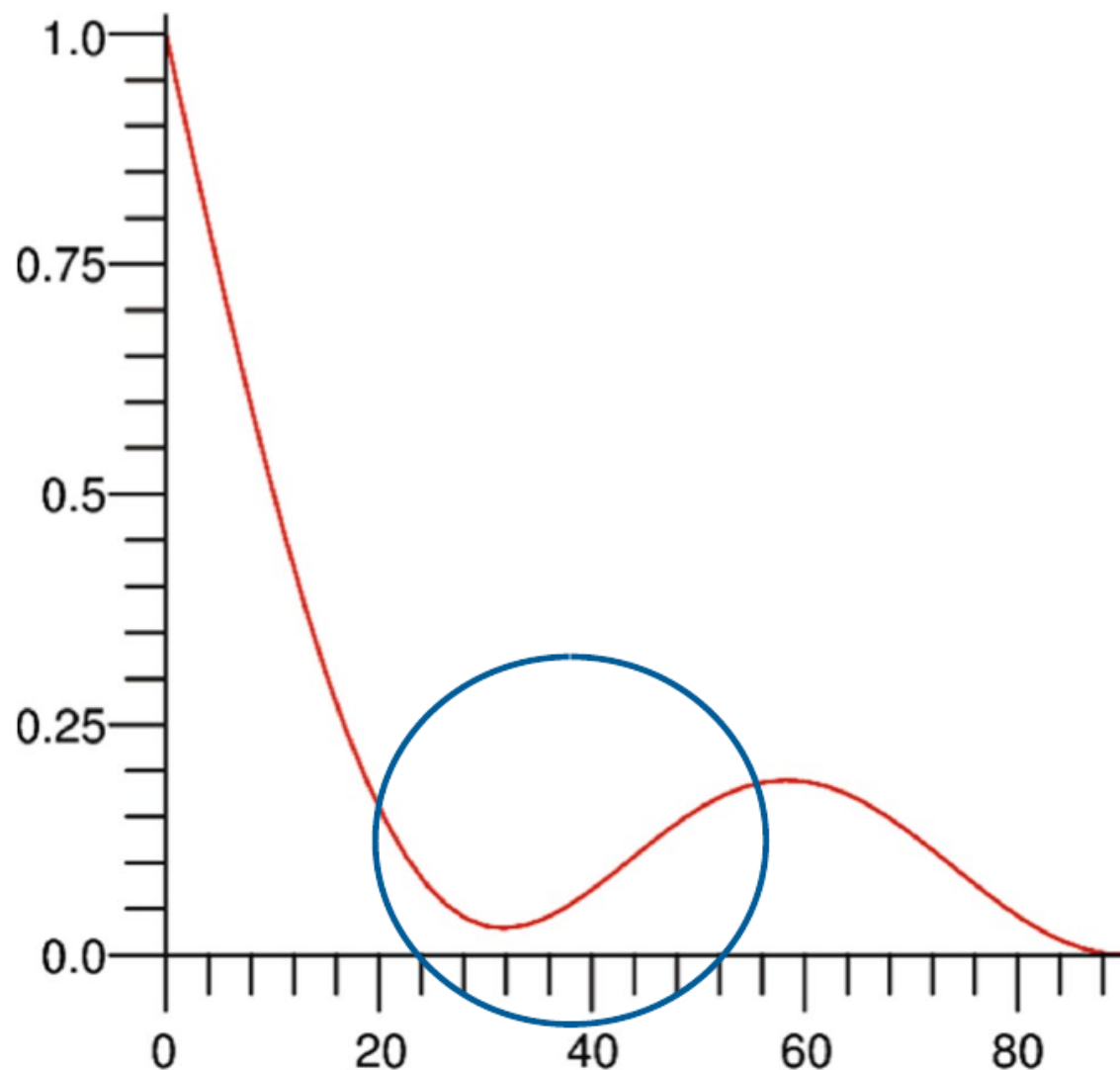
- при потеплении  $\partial_y \bar{\theta}$  уменьшается
- при похолодании  $\partial_p \bar{\theta}$  уменьшается

## Зависимость отклика характеристик гидрологического цикла на изменение температуры [Kurgansky, 2022]

доля площади полушария, занятой блокингами

Двубоксовая модель.

Параметры вычисляются  
максимизации энтропии  
Шэннона по состояниям



широта границы ячейки Хэдли

# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- **Критические точки при изменении состояния Земной системы**
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

## Классификация критических точек (tipping points) динамических систем [Ashwin et al., 2022]

Переход через критическую точку – качественное изменение поведения динамической системы

Для системы с вектором состояния  $x$  и вектором параметров  $\mu$  возможны критические точки:

тип	описание	причина
B-tipping	переход через точку бифуркации при изменении	$\mu$
N-tipping	выход из зоны притяжения аттрактора из-за случайных воздействий	динамика системы
R-tipping	параметрическое изменение параметров системы масштаба инерции системы; при этом также возможен выход траектории системы	соотношение между $d\mu/dt$ и $dx/dt$

## Примеры критических точек для ЭБМ [Ashwin et al., 2012] (1)

$$c \frac{dT}{dt} = R \downarrow - R \uparrow$$

$$R \downarrow = \frac{1}{4} \mu I_0 (1 - \alpha_p(T))$$

$$R \uparrow = e_{SA} \sigma T^4$$

$$\alpha_p(T) = a_2 - b_2 T^2$$

⇓

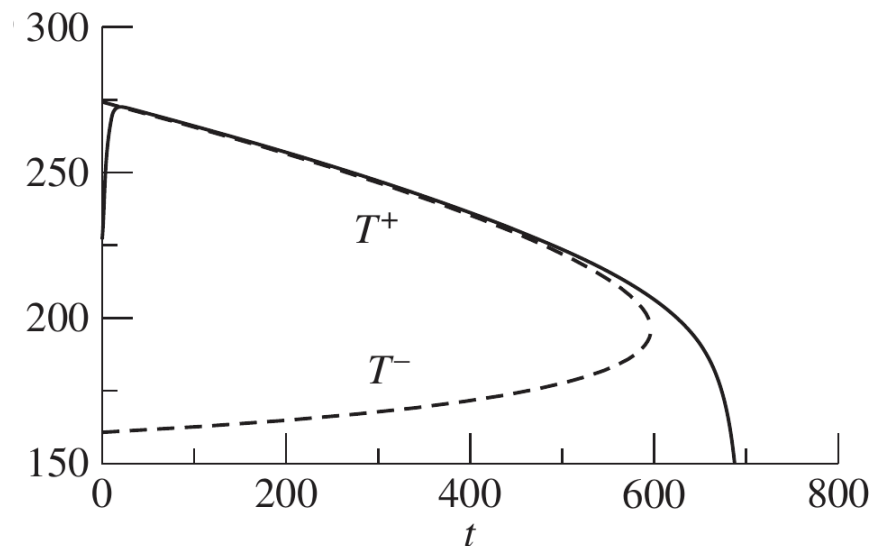
$$\frac{dT}{dt} = f(T) = c^{-1} a (-T^4 + b_\mu T^2 - d_\mu)$$

$$a = \frac{e_{SA} \sigma}{c}, \quad b_\mu = \frac{\mu I_0 b_2}{4 e_{SA} \sigma}, \quad d_\mu = -\frac{\mu I_0 (1 - a_2)}{4 e_{SA} \sigma}$$

## Примеры критических точек для ЭБМ [Ashwin et al., 2012] (2)

### B-tipping ( $\mu = \mu(t)$ ):

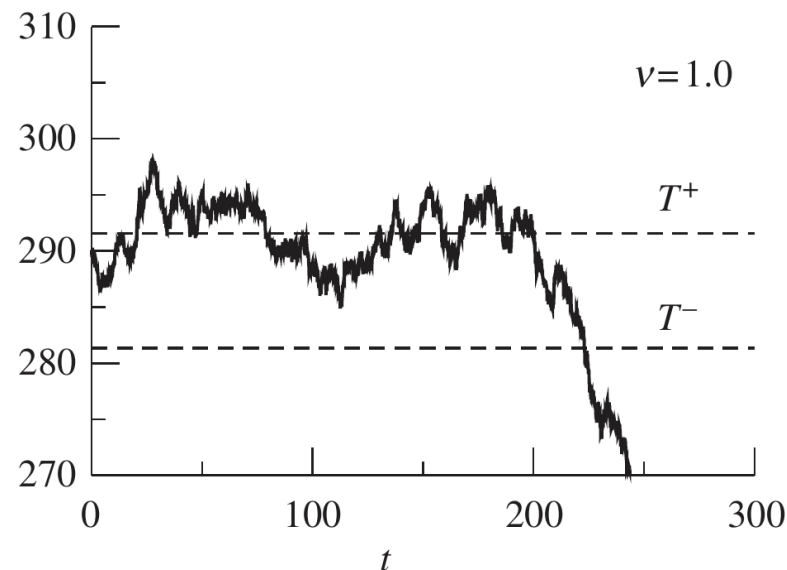
- При  $\mu > \mu_c$  ( $0 < \mu_c < 1$ ) у системы два положения равновесия ( $T_+$ ,  $T_-$ )
- При уменьшении  $\mu$  и переходе через  $\mu_c$  происходит бифуркация "седло-узел" и положение равновесия становится единственным
- Траектория системы стремится к "белой Земле"



### N-tipping [Sutera, 1981]:

$$dT = f(T)dt + \sqrt{\nu} dW$$

( $W$  – винеровский процесс)

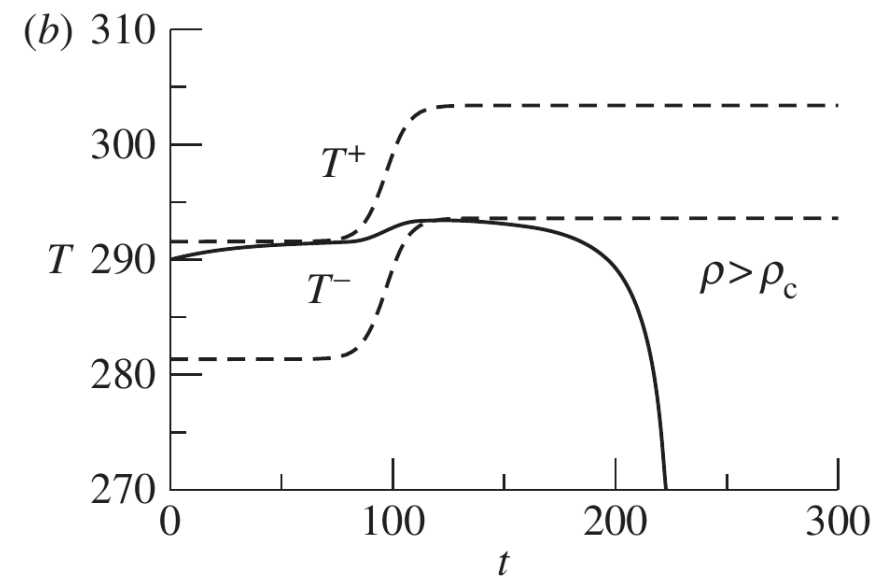
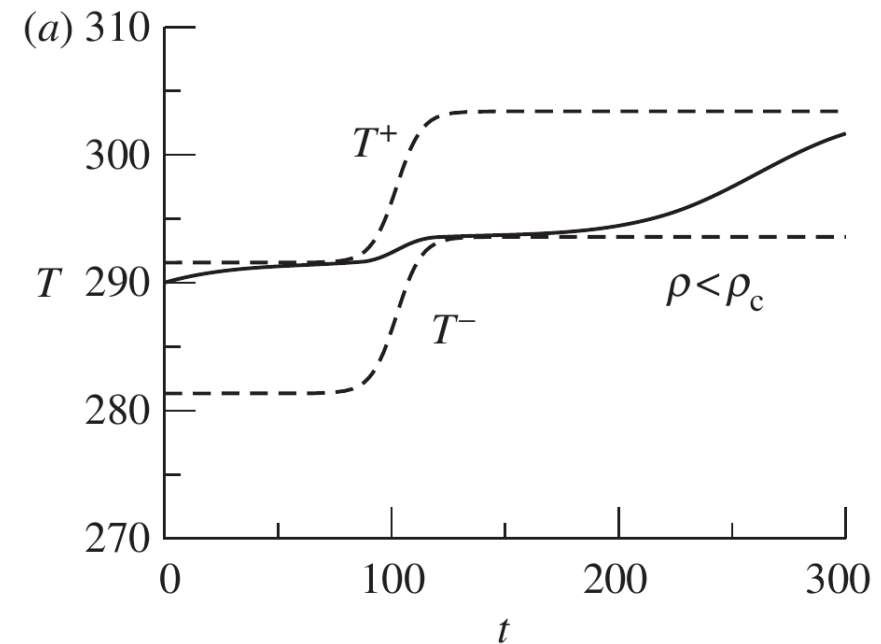




## Примеры критических точек для ЭБМ [Ashwin et al., 2012] (3)

R-tipping:

$$\rho = dx/dt$$

 $\rho_c$  – критическое значение

## Критические элементы ЗКС [Steffen et al., 2018]

Определяются:

– набором климатических показателей, связанных с данным процессом (температура, осадки, перенос вещества);

– переходом показателя через пороговое значение (известны плохо);

– временем перехода

в новое состояние:

быстрое:  $\approx 10$  лет,

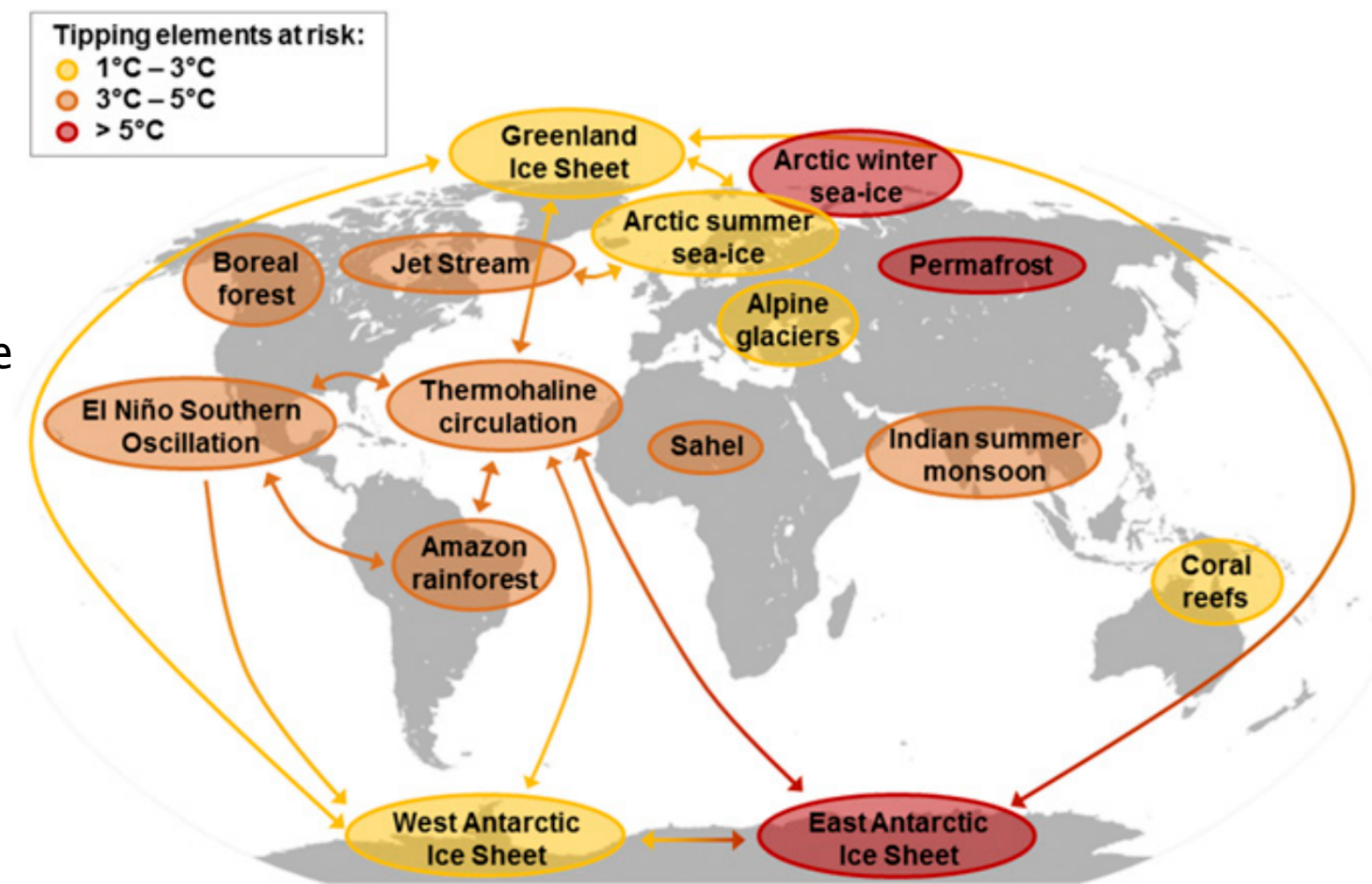
умеренное:

$\approx 100$  лет,

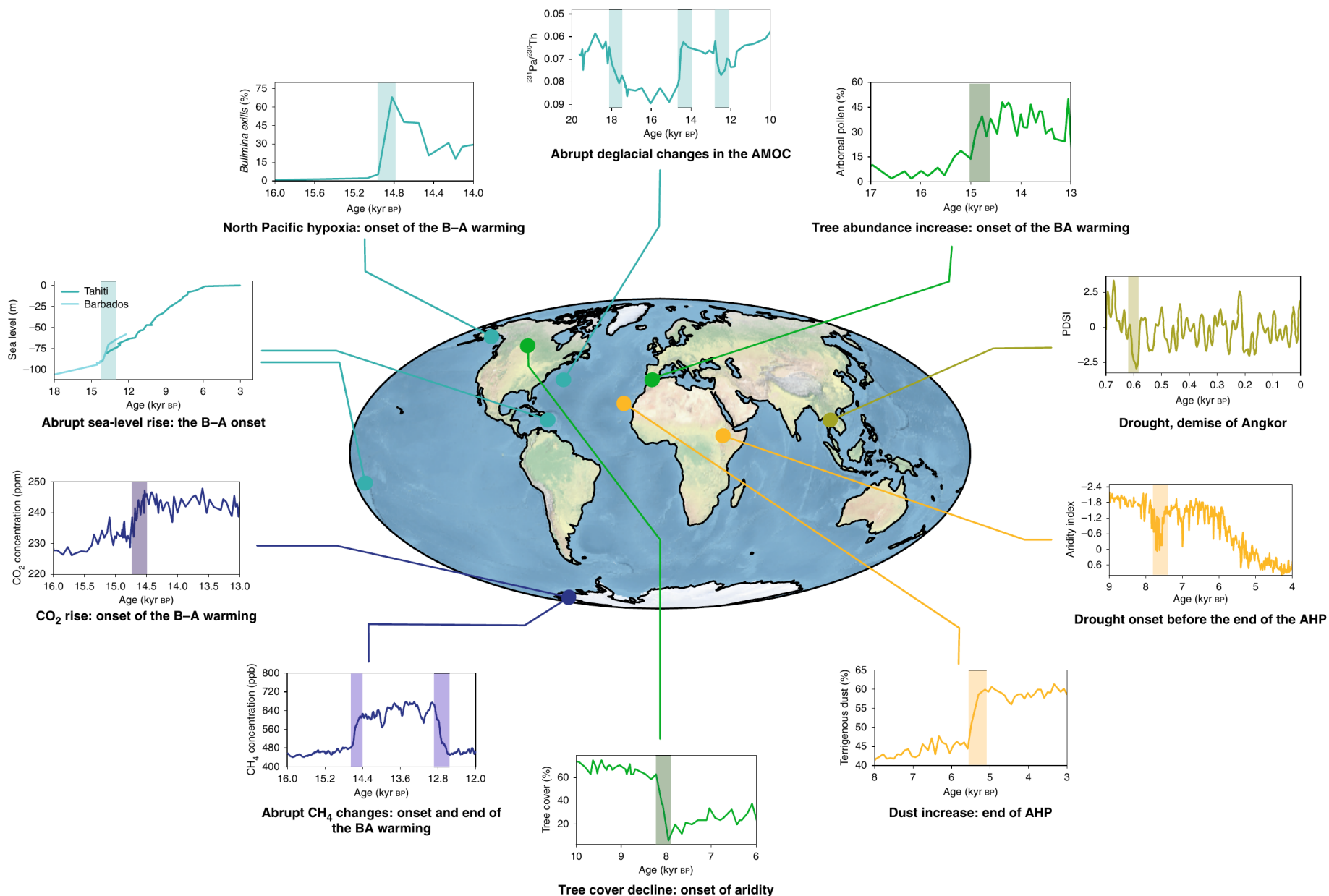
медленное:

$\approx 1000$  лет;

– возможно каскадное развитие между отдельными критическими элементами

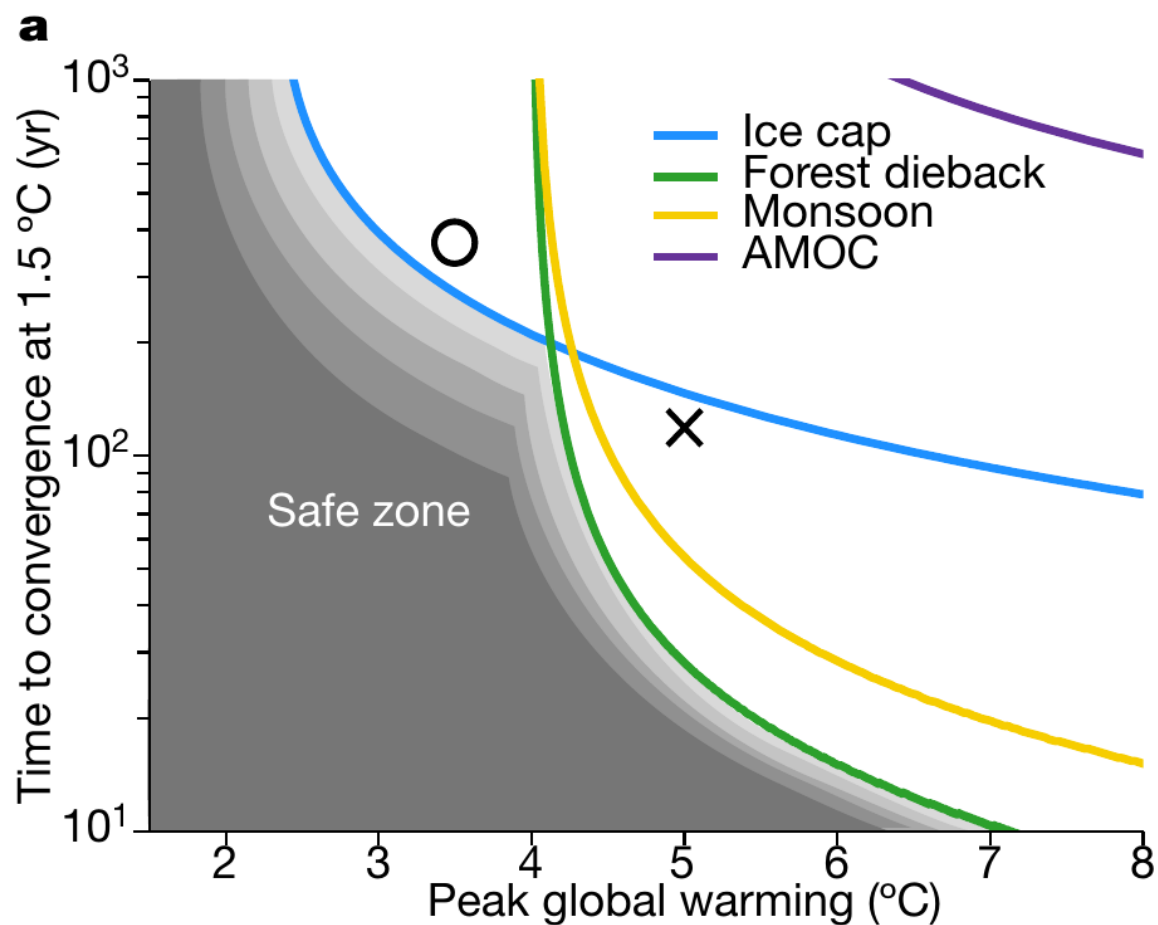


# Критические точки для палеоклимата [Brovkin et al., 2021]



## Время развития критических точек и возможное нахождение системы в закритическом состоянии [Ritchie et al., 2021]

- простые модели формирования ряда критических точек
- пороговые значения – из [Steffen et al., 2018]



# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

# Гистерезис и необратимость изменений

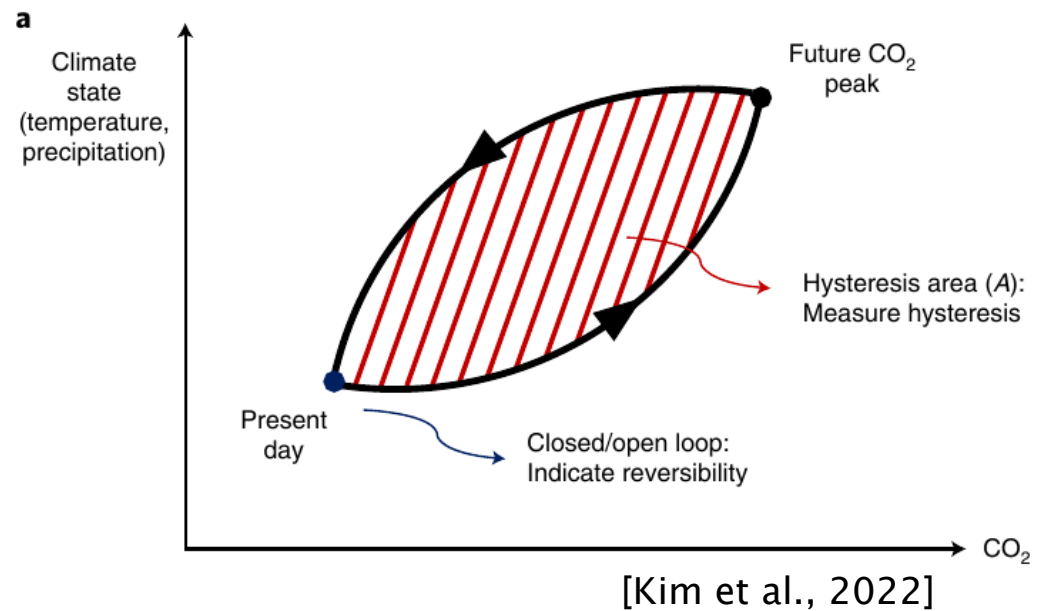
IPCC WG1 AR6 глоссарий:

**Abrupt change:** A change in the system that is substantially faster than the typical rate of the changes in its history.

**Irreversibility:** A perturbed state of a dynamical system is defined as irreversible on a given timescale, if the recovery from this state due to natural processes takes substantially longer than the timescale of interest.

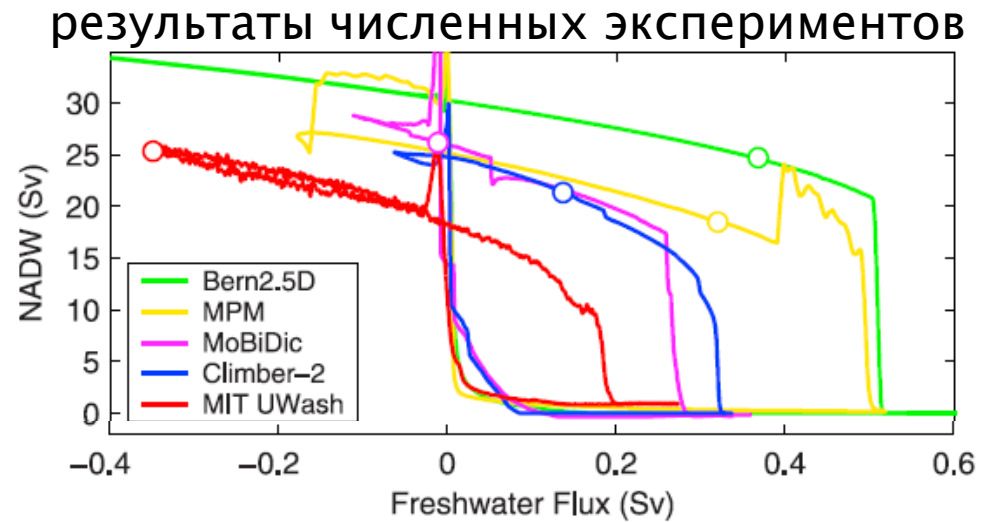
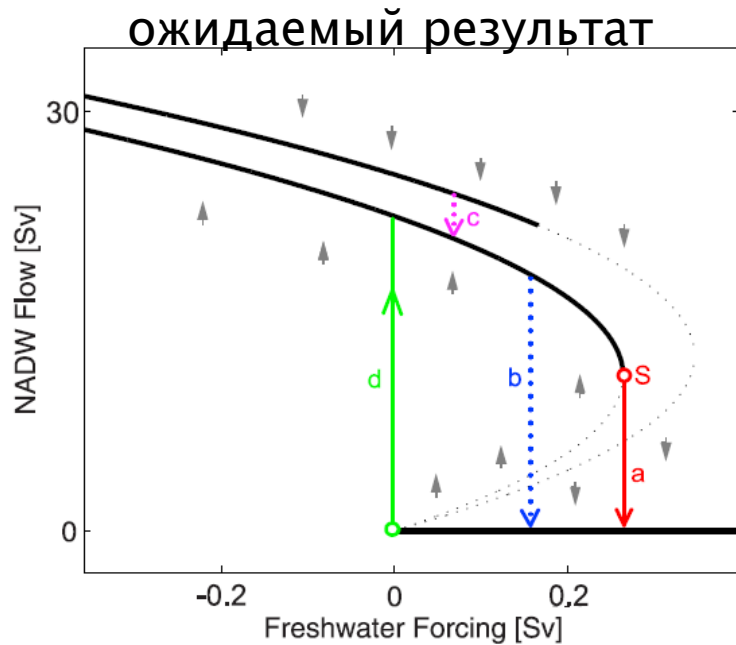
**Tipping point:** A critical threshold beyond which a system reorganizes, often abruptly and/or irreversibly.

**Tipping element:** A component of the Earth System that is susceptible to a tipping point.

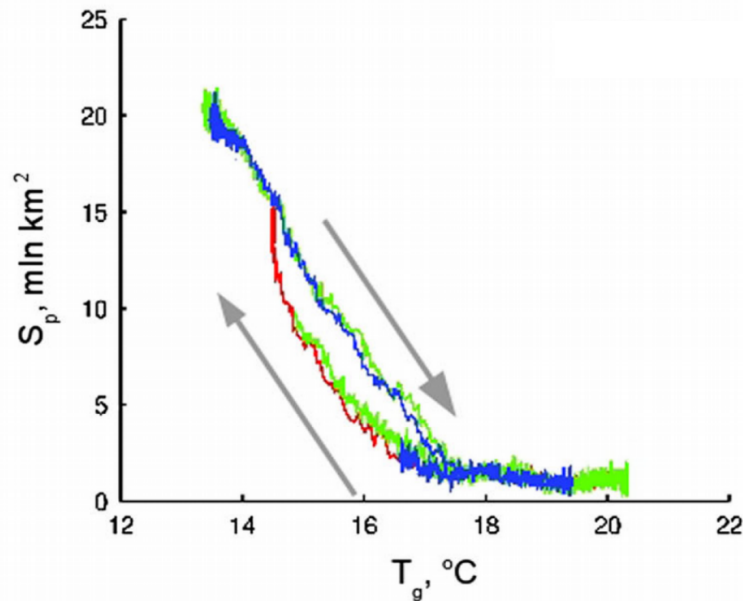
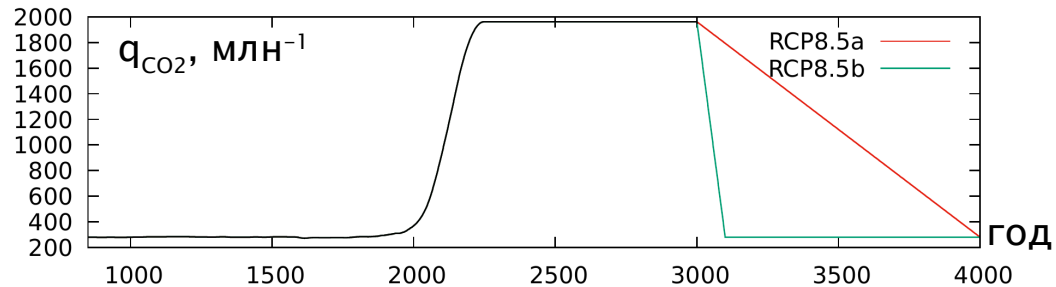


# Мультистабильность океанического конвейера [Rahmstorf et al., 2005]

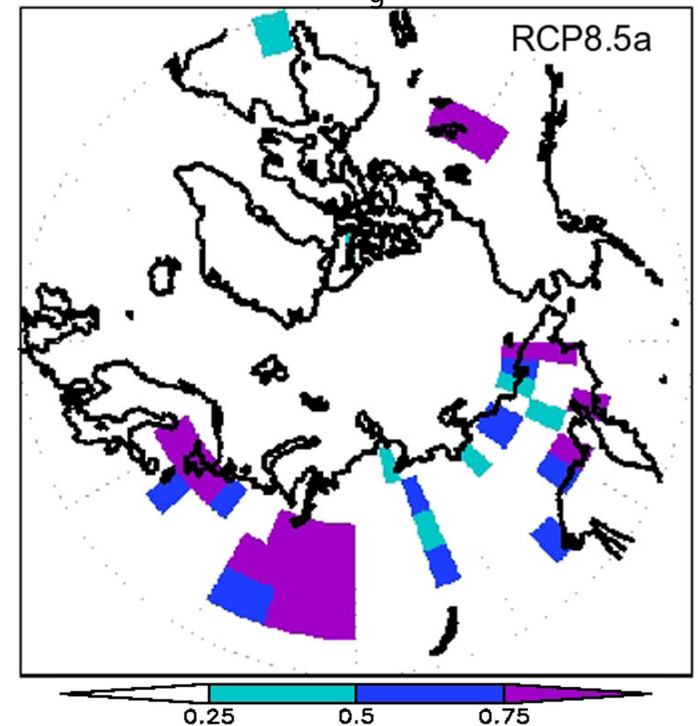
Результаты модельных расчётов с искусственным потоком пресной воды из атмосферы в Северную Атлантику



# Площадь распространения приповерхностной вечной мерзлоты [Елисеев и др., 2012; Eliseev et al., 2014]



Различие S<sub>p</sub> между ветвями при 15.2°C ≤ T<sub>g</sub> ≤ 15.8°C



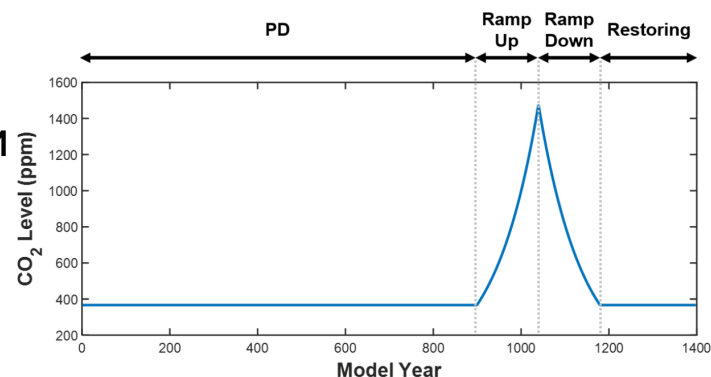
Линейный механизм: медленное распространение сигнала в богатой органикой почве

При единичном изменении глобальной температуры многолетнемёрзлые грунты разрушаются быстрее, чем восстанавливаются при последующем похолодании



## Гистерезис температуры и осадков [Kim et al., 2002]

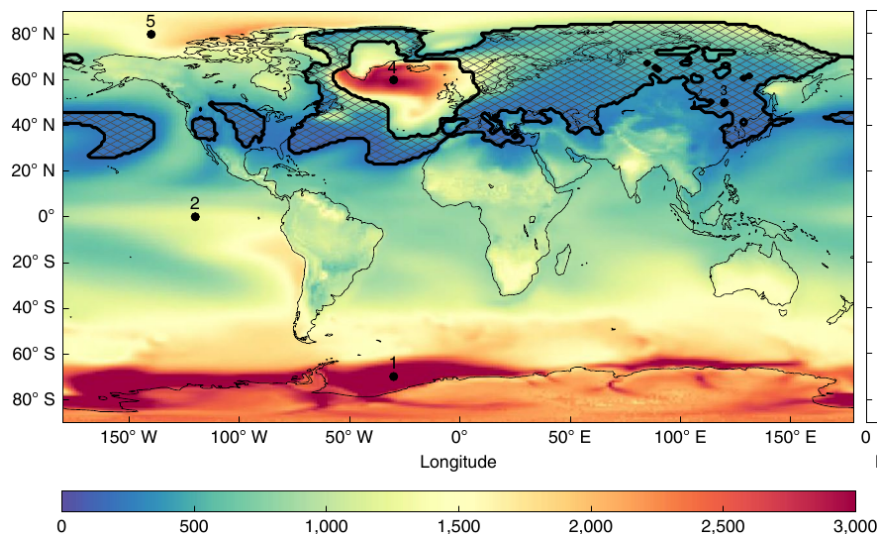
- МОЦ CESM1.2
- 28 реализаций с различными начальными условиями
- анализ проведён для среднего по ансамблю (вынужденный отклик)



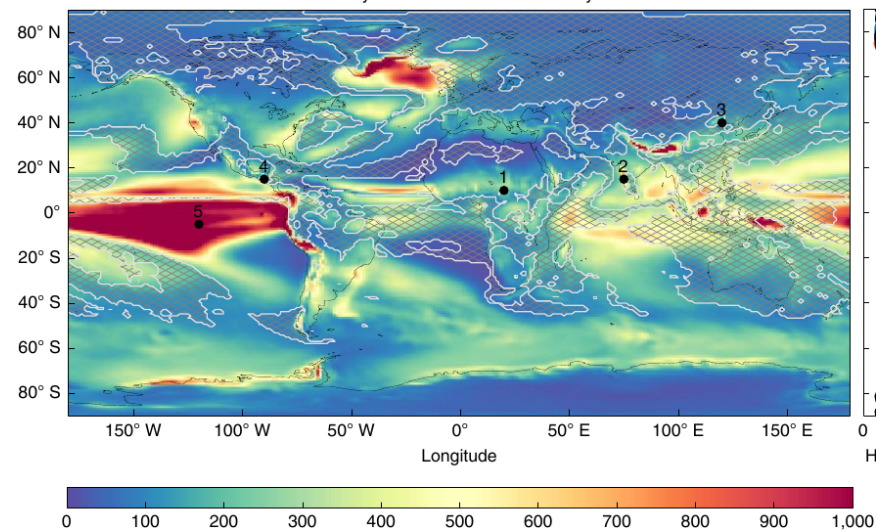
Площадь гистерезисной петли:

$$A = \int_{F_{\text{present}}}^{F_{\text{peak}}} |x_{\text{down}}(F) - x_{\text{up}}(F)| dF.$$

температура ( $^{\circ}\text{C}$  млн $^{-1}$ )



осадки ( $\text{мм сут.}^{-1}$  млн $^{-1}$ )



Механизм также линеен

# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

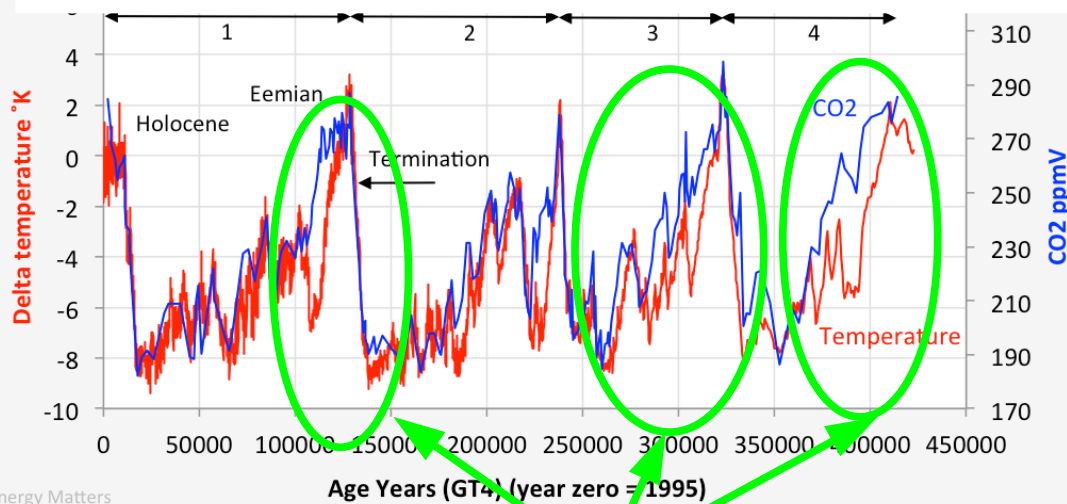
## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- **Взаимное запаздывание между температурой и CO<sub>2</sub> в атмосфере**

## Выводы

# Взаимное запаздывание между $q_{CO_2}$ и температурой: введение

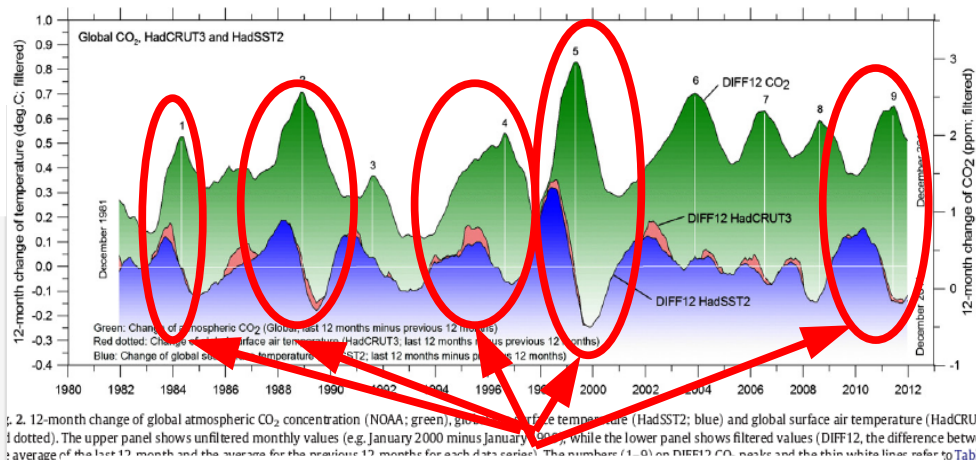
## Ледниковые циклы плейстоцена (данные ледовых кернов станции Восток, Антарктида)



Energy Matters  
euanmearns.com  
<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok.htm>

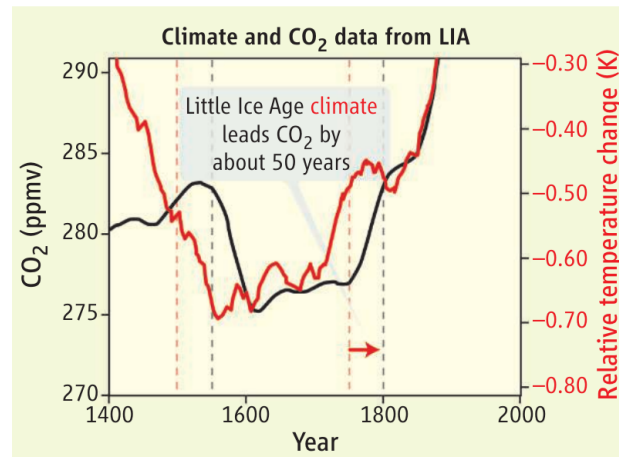
температура опережает  $q_{CO_2}$  на несколько столетий

## Анализ инструментальных данных [Humlum et al., 2013] (межгодовые инкременты)

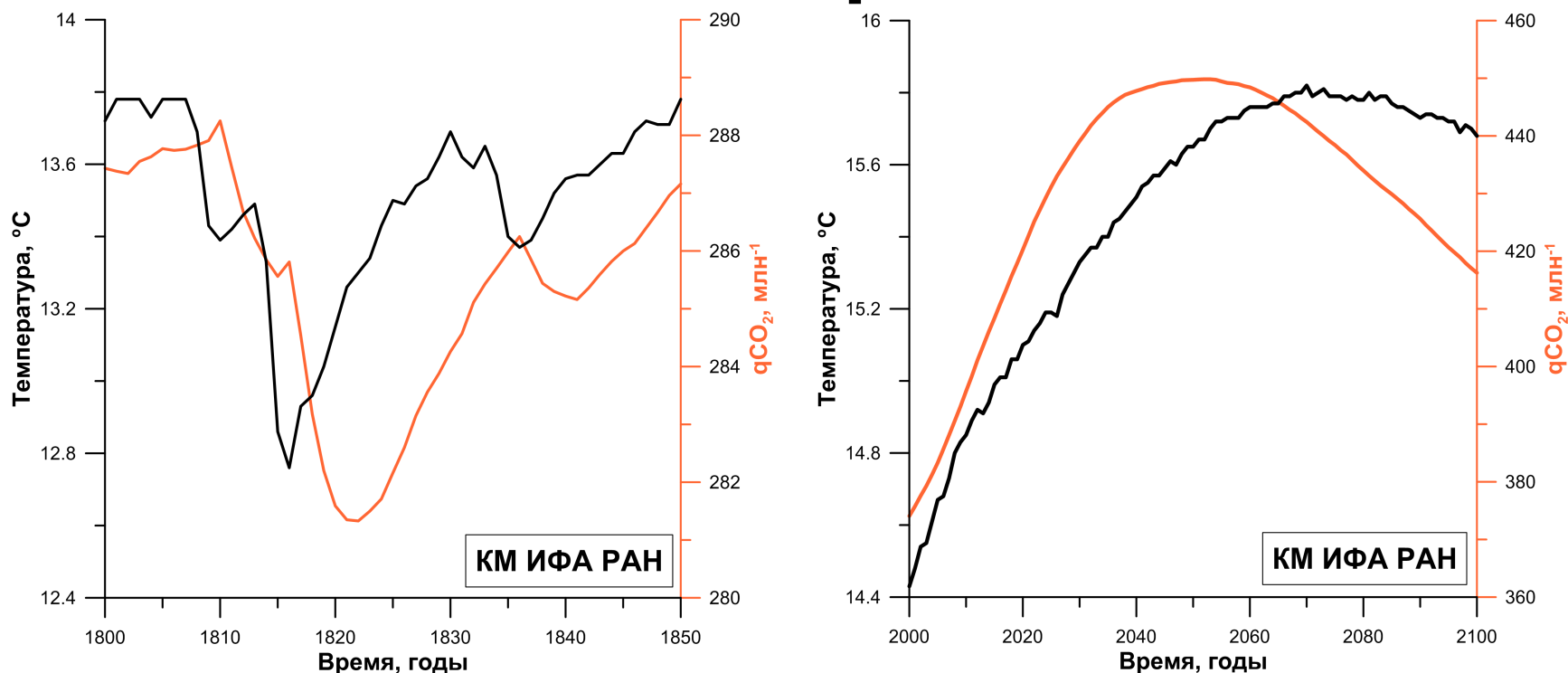


температура опережает  $q_{CO_2}$  на 10 мес.

## Реконструкции для малого ледникового периода [Cox et al., 2008]



## Взаимное запаздывание между глобальной температурой и $q_{\text{CO}_2}$ [Muryshev et al., 2017; Мурышев и др., 2015, 2018, 2019, 2021]



Запаздывание отклика содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере относительно отклика температуры (проявляющееся в ледниковых циклах и в малый ледниковый период) не противоречит представлениям о преобладающем антропогенном вкладе в современные изменения климата

## Взаимное запаздывание между глобальной температурой и q<sub>CO<sub>2</sub></sub>: линейный механизм [Мурышев и др., 2015]

Проявляется уже в линейной модели:

$$\frac{dq}{dt} = (\beta_{oc} + \beta_{land})q + \alpha D + A_R M + \gamma T + E(t),$$

$$\frac{dD}{dt} = -\beta_{oc}q - \alpha D,$$

$$\frac{dM}{dt} = -\beta_{land}q - A_R M - \gamma T,$$

$$\frac{dT}{dt} = Rq + \nu T + R_T(t).$$

q – содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере

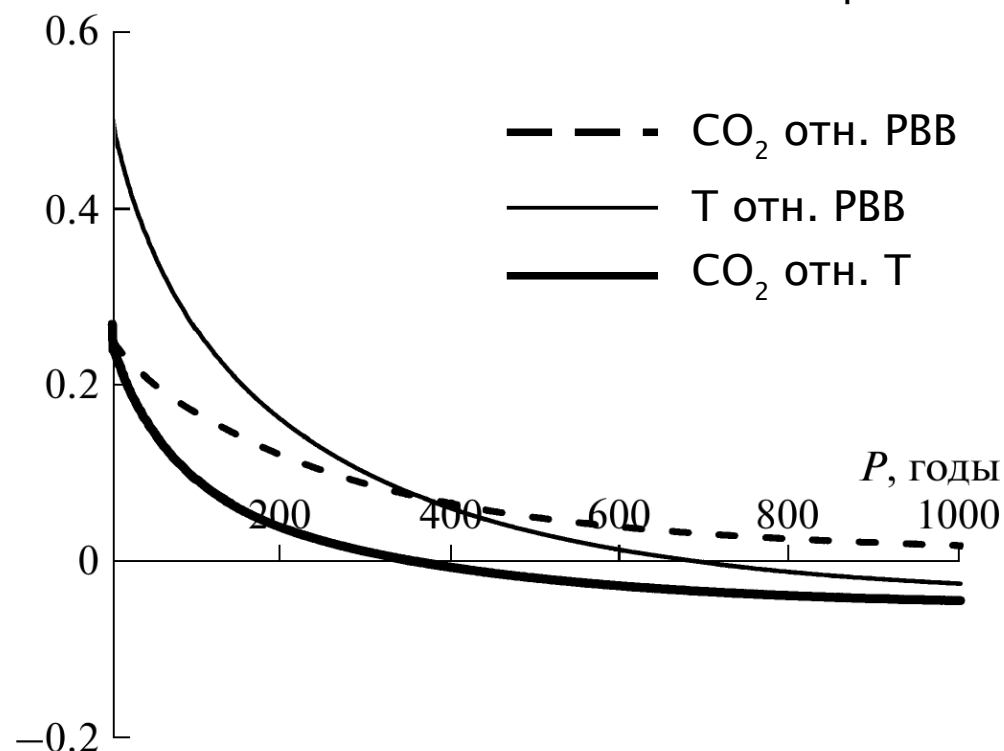
D – запас углерода в океане

M – запас углерода в наземных экосистемах

T – приземная температура

R<sub>T</sub>(t) – предписанное (не связанное с CO<sub>2</sub>) PVB

относительное запаздывание Δ/P при наличии непарникового R<sub>T</sub>

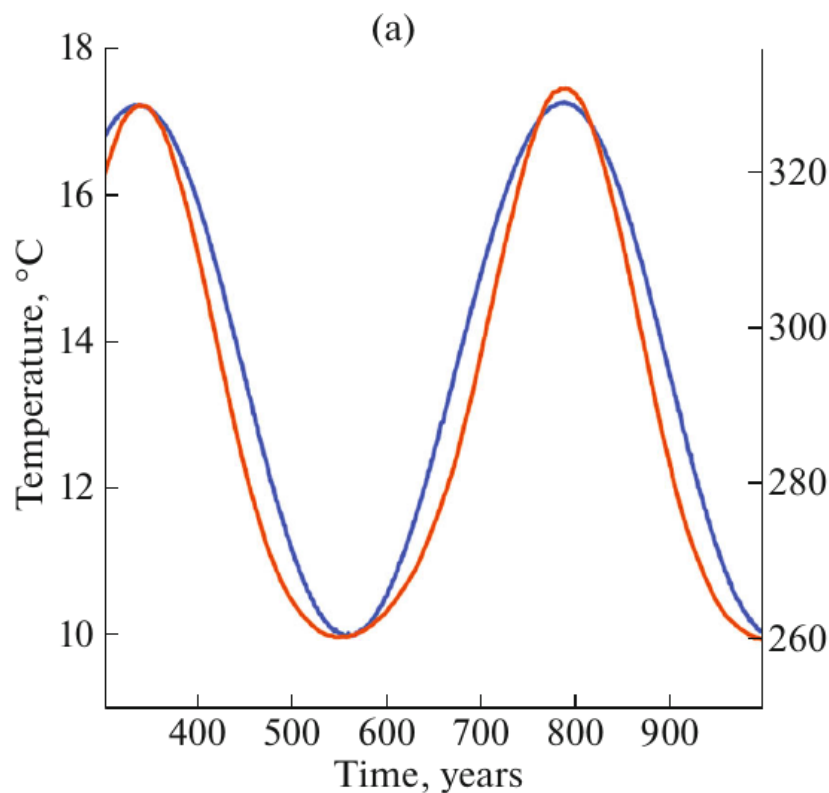


## Взаимное запаздывание между глобальной температурой и $q_{\text{CO}_2}$ : нелинейный механизм [Мурышев и др., 2021]

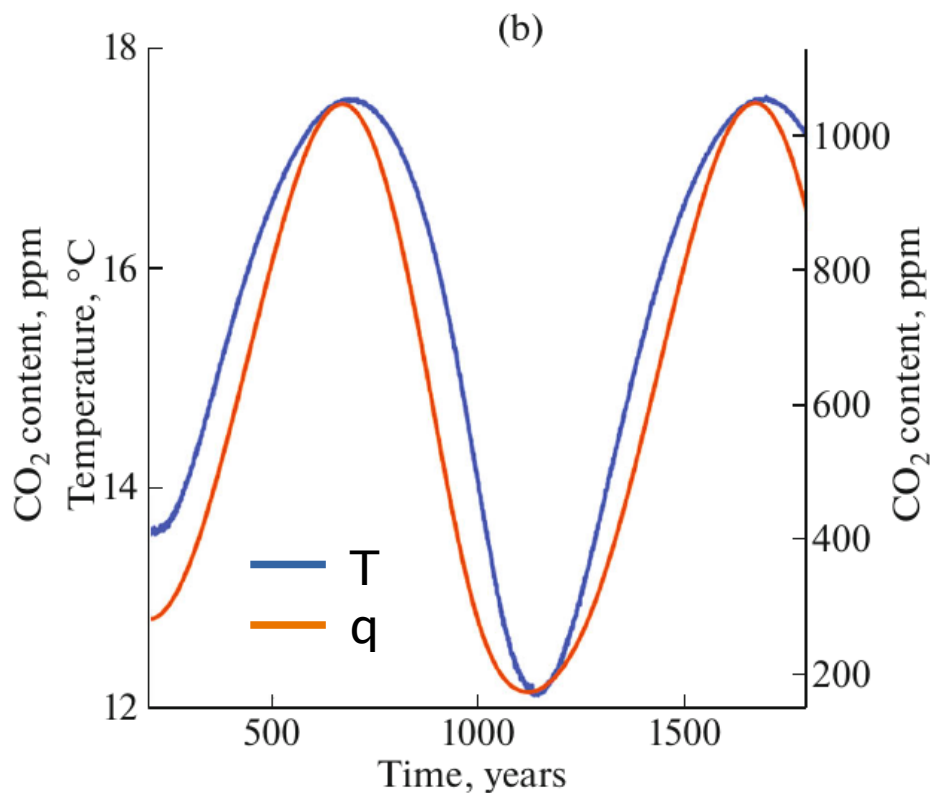
Численные эксперименты с КМ ИФА РАН

Связан преимущественно с нелинейностью зависимости РВВ  $\text{CO}_2$  от его концентрации в атмосфере

изменение солнечной  
постоянной с  $P = 450$  лет



внешние эмиссии  $\text{CO}_2$   
с  $P = 1000$  лет



# План

## Часть I

- Современные и будущие изменения климата в контексте палеоклиматических изменений
- Причины климатических изменений и связанные с ними процессы

## Часть II

- Линейный отклик Земной системы
- Уходящая длинноволновая радиация: пример линейной зависимости со скрытыми нелинейностями
- Обратные связи и подстройка отклика компонент Земной системы при внешнем воздействии
- Нелинейность отклика характеристик климата на изменение климата
- Критические точки при изменении состояния Земной системы
- Гистерезисоподобные явления в ЗКС: линейные и нелинейные механизмы
- Взаимное запаздывание между температурой и  $\text{CO}_2$  в атмосфере

## Выводы

## Выводы

- Современные климатические изменения происходят с беспрецедентной скоростью.
- Судя по ряду данных, глобальная температура уже превысила значение оптимума среднего голоцена (хотя на региональном уровне это не всегда выполняется)
- Современная концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере ( $412 \text{ млн}^{-1}$  в 2020 г.) беспрецедентна для последних 2 млн. лет.
- Основной причиной современного потепления является антропогенная деятельность ( $0.8\text{--}1.3 \text{ K}$  из  $0.95\text{--}1.20 \text{ K}$ ), прежде всего – эмиссии ПГ ( $1\text{--}2 \text{ K}$ )
- На глобальном уровне линейный отклик на РВВ близок к полному (ошибка  $\leq 10\%$ )
- Нелинейные особенности отклика связаны как с быстрой подстройкой системы к РВВ, так и с формированием вынужденного сигнала
- Нелинейность отклика проявляется в зависимости равновесной чувствительности климата от его состояния и в зависимости этой чувствительности от времени
- Ряд оценок указывает, что особенности отклика климата качественно зависят не только от абсолютной величины воздействия, но и от его знака и скорости изменения
- Для отдельных процессов формирования отклика проявляются и линейные, и нелинейные механизмы
- Нелинейные особенности могут привести к формированию критических точек на траектории изменения климата