

# Геофизика



---

2024 Лекция № 10

---

Елисеев Алексей Викторович  
*отделение геофизики, физический факультет МГУ*

---

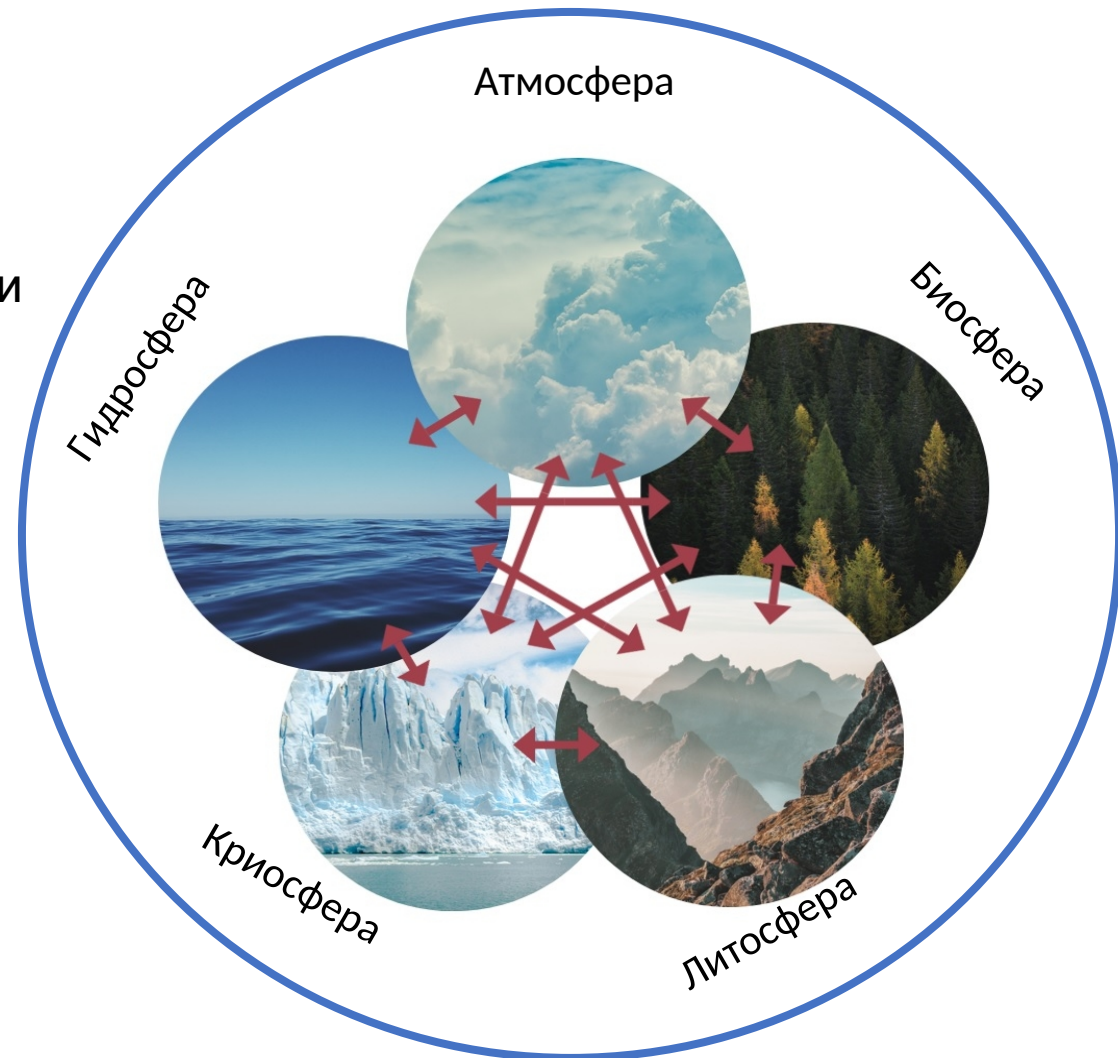
<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

**Энергетика земной климатической  
системы. Изменения климата и общие  
подходы к их моделированию**

# Общая структура Земной климатической системы (1)

Основные компоненты (оболочки) климатической системы:

- Атмосфера
- Гидросфера (океан, реки, болота и т.д.)
- Литосфера (верхний деятельный слой суши)
- Криосфера (ледники, снег, мерзлота)
- Биосфера (наземные и морские экосистемы)



# Потоки энергии в климате: среднеглобальные значения [Trenberth et al., 2009]

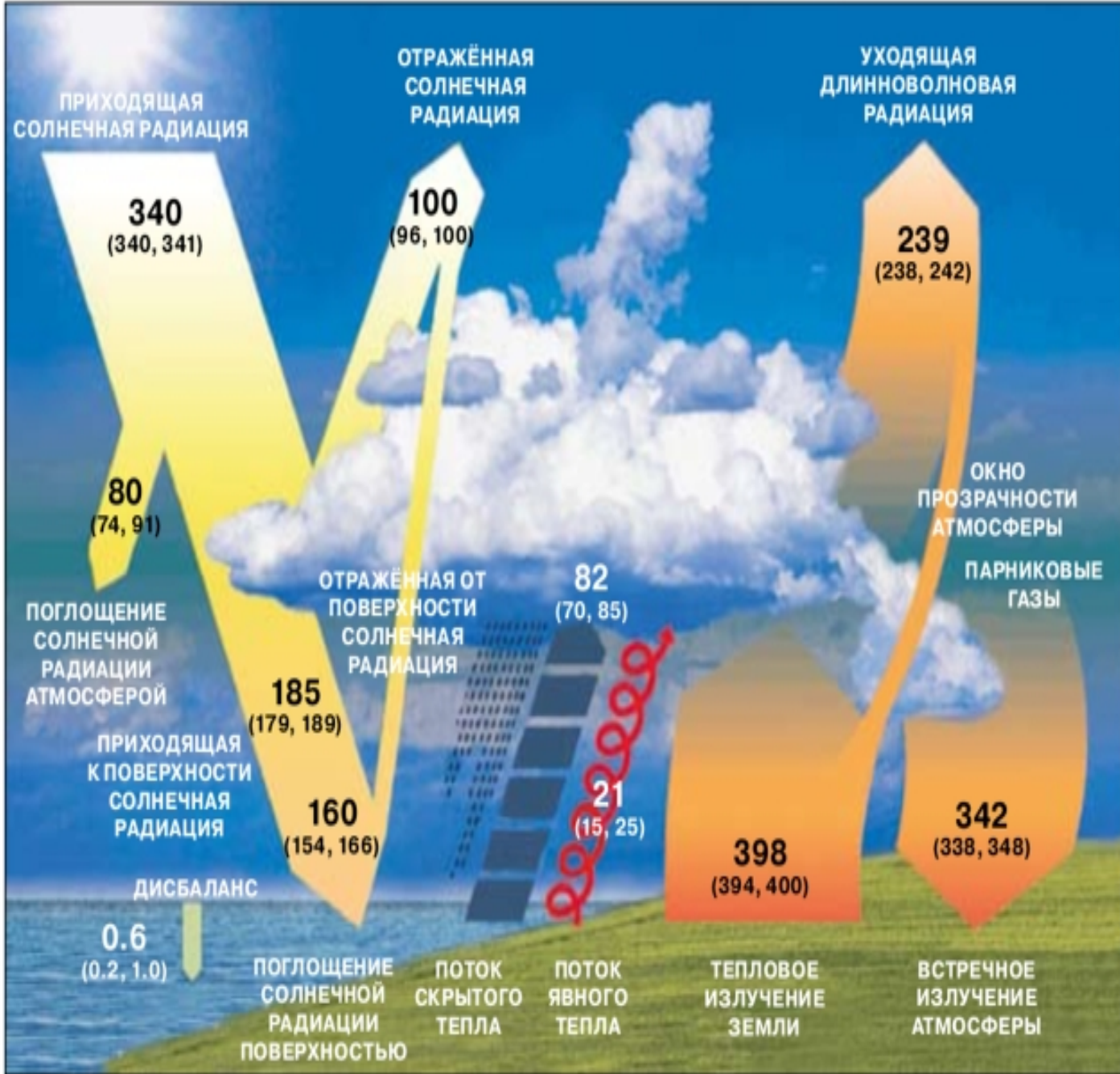


Иллюстрация: Wild et al., 2017, doi: 10.1007/s00382-014-2430-z. (Адаптировано.)

верхняя граница атмосферы

поверхность суши или океана

# Потоки энергии в климате: среднеглобальные значения [Trenberth et al., 2009]

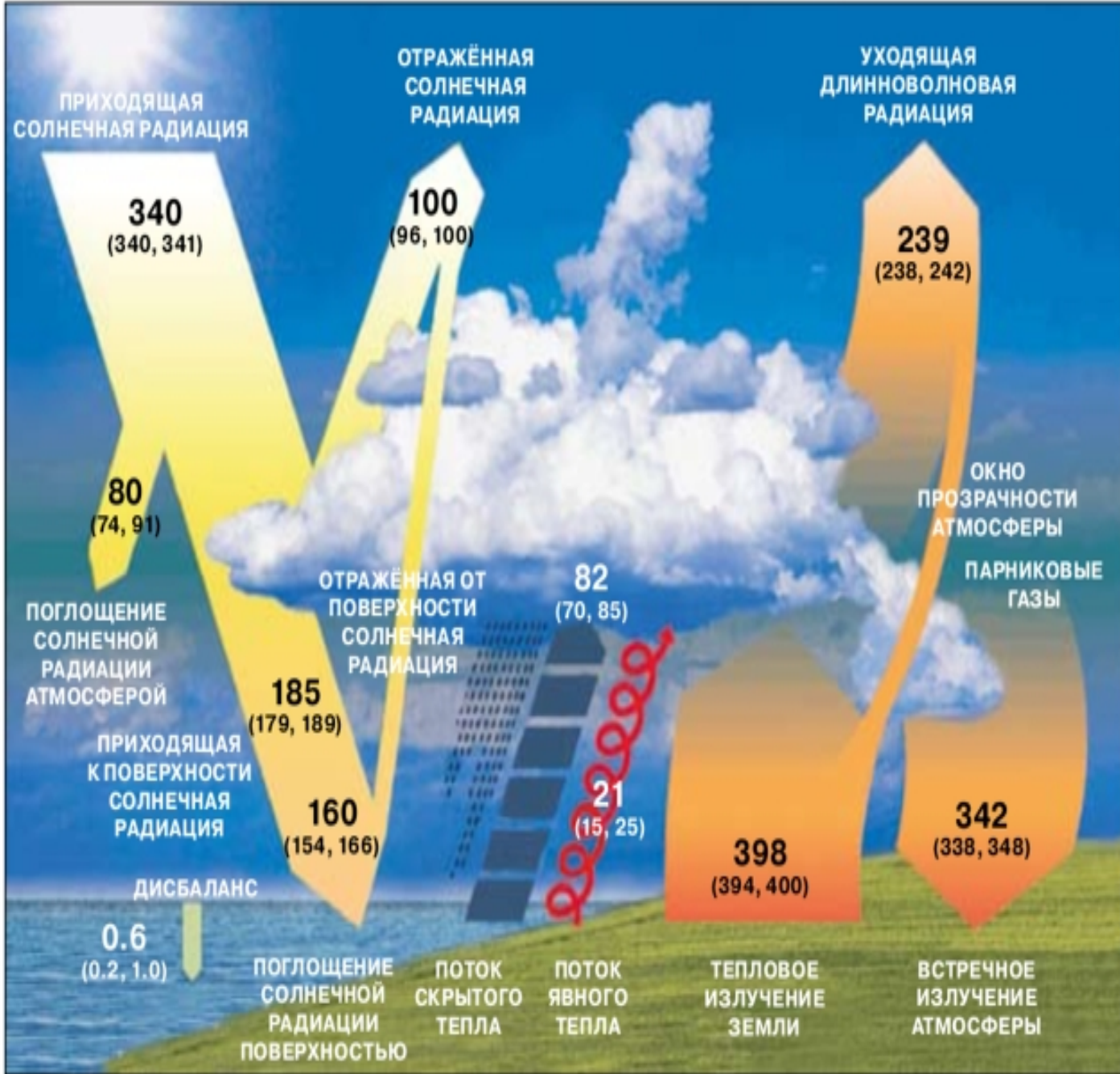


Иллюстрация: Wild et al., 2017, doi: 10.1007/s00382-014-2430-z. (Адаптировано.)

верхняя граница атмосферы

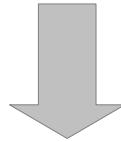
За год человечество вырабатывает электроэнергии  $27 \cdot 10^{15}$  Вт·ч  $\approx 10^{20}$  Дж (данные British Petroleum). Это соответствует среднему потоку энергии  $0.006$  Вт/м<sup>2</sup>

поверхность суши или океана

# Потоки энергии в климате: география [Trenberth, Fasullo, 2017] (1)

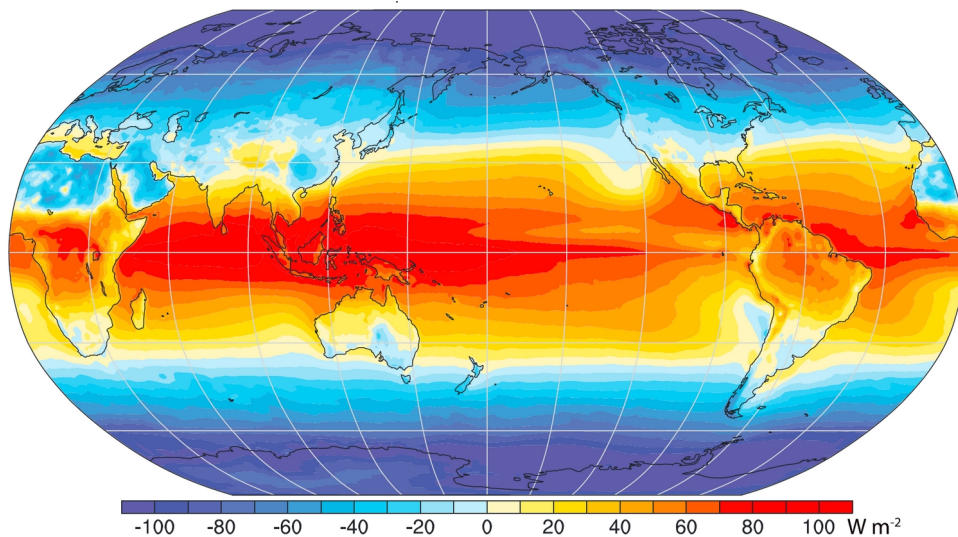
$$\nabla \cdot \mathbf{F}_A = Q_1 - Q_2 = R_T + F_S$$

$$F_S = -dOHC/dt - \nabla \cdot \mathbf{F}_O$$

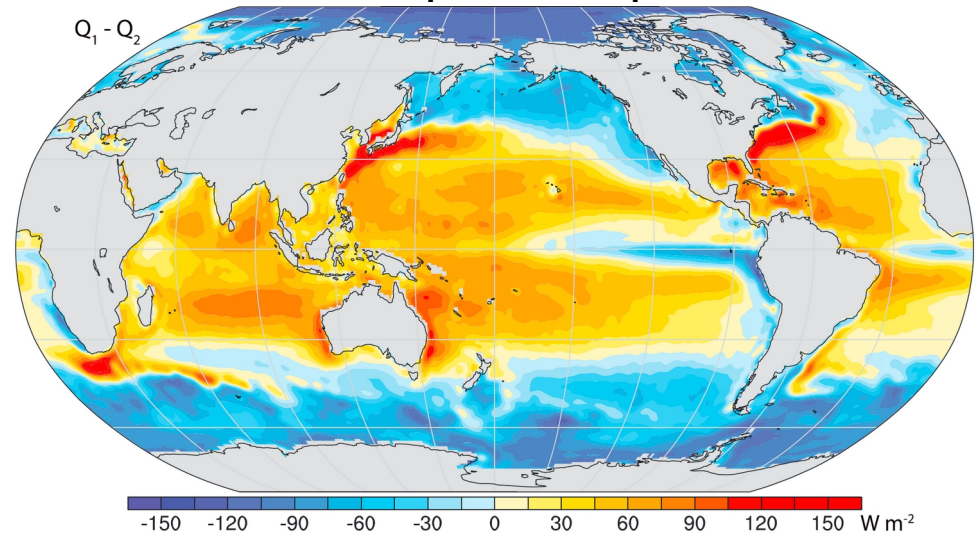


$$\text{МНТ}(\phi) = \int_{\phi}^{90} [F_S + dOHC/dt] a d\phi$$

$R_T$ : радиационный баланс на ВГА  
(CERES, 2000–2014 гг.)

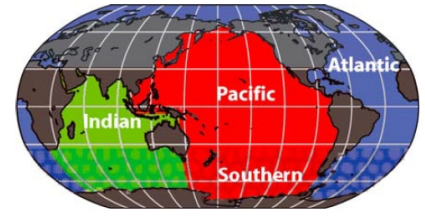
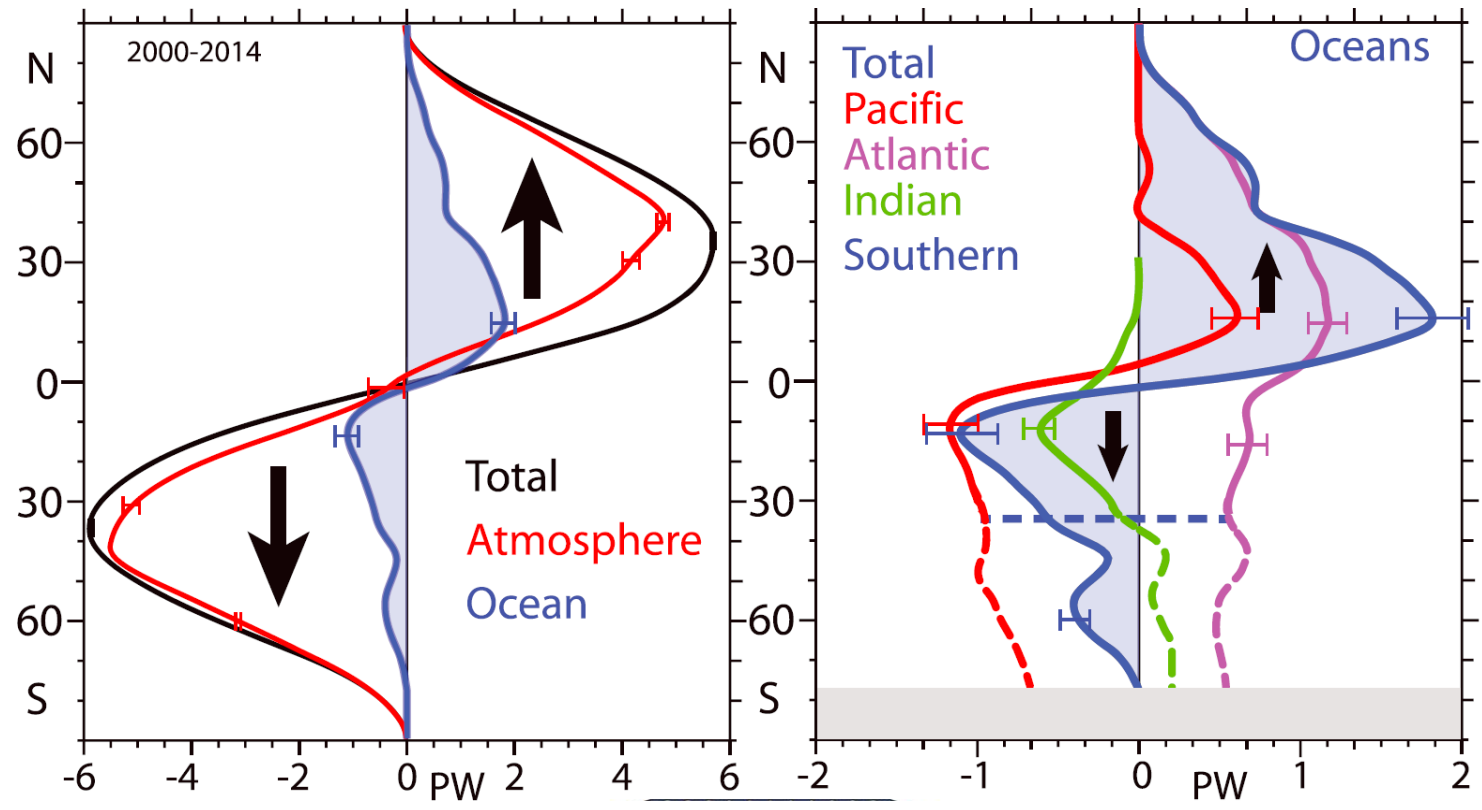


$\text{div } \mathbf{F}_A =$   
 $= Q_1$  (все притоки энергии) –  
 $- Q_2$  (приток скрытого тепла)

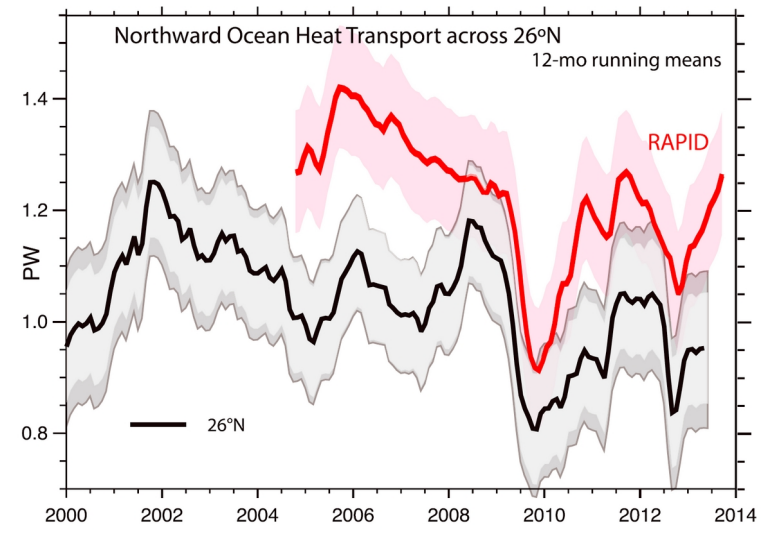


# Потоки энергии в климате: география [Trenberth, Fasullo, 2017 (2)]

среднегодовой поток тепла на север [ПВт]

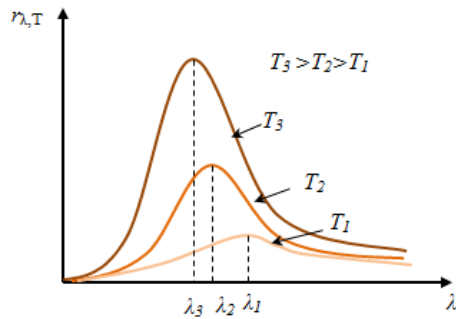


Атлантика, 26°с.ш.



# Физика парникового эффекта

спектр излучения

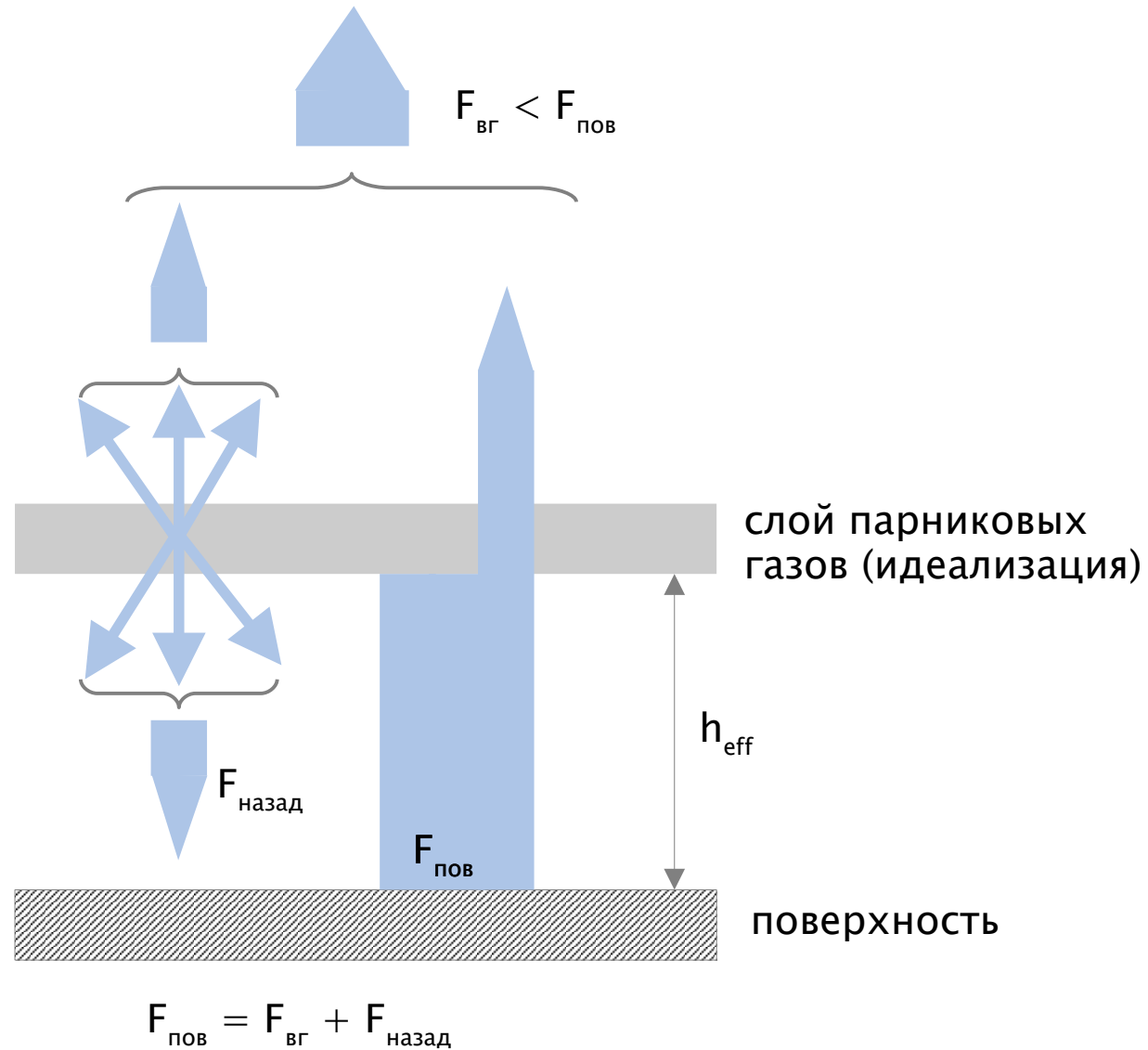


поглощение фотона молекулой

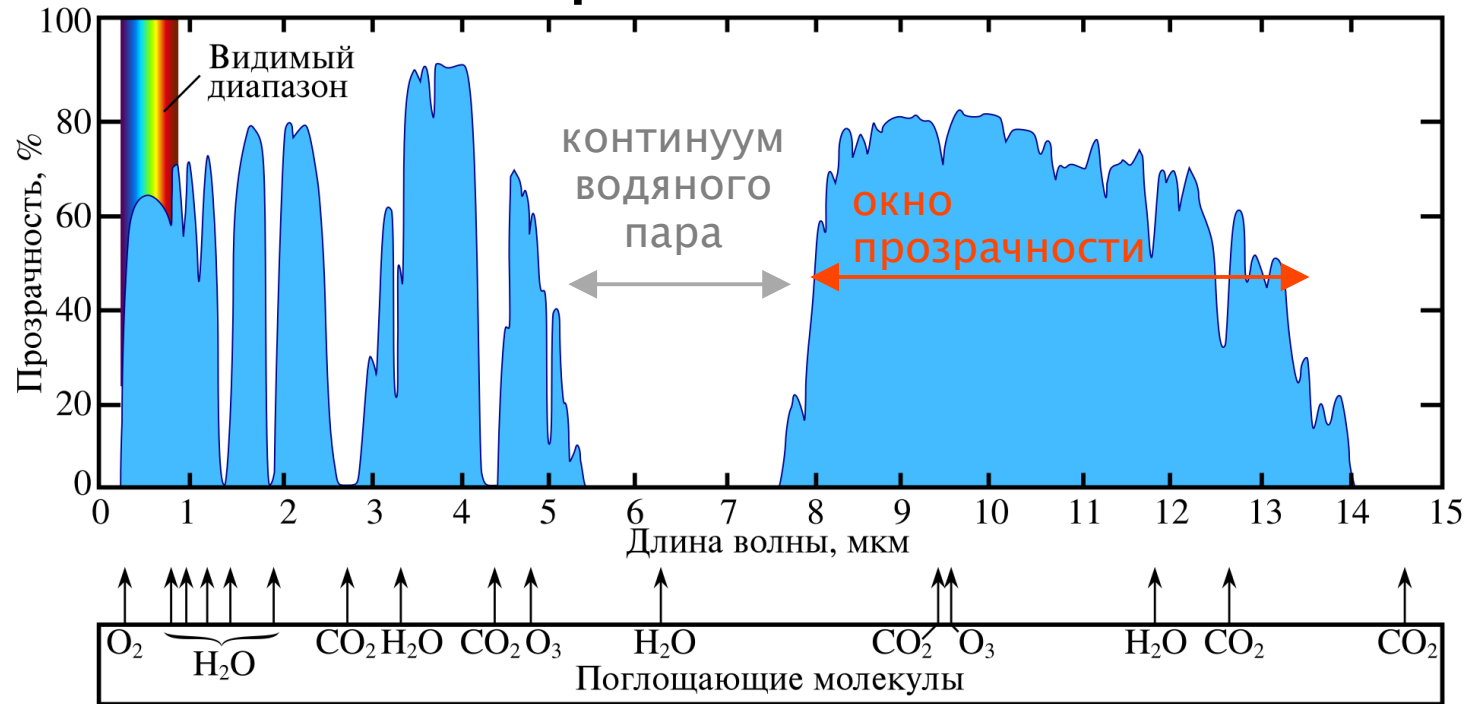
переход атома(ов) молекулы в состояние с более высокой энергией

переизлучение

переход "направленного" излучения в случайно ориентированное

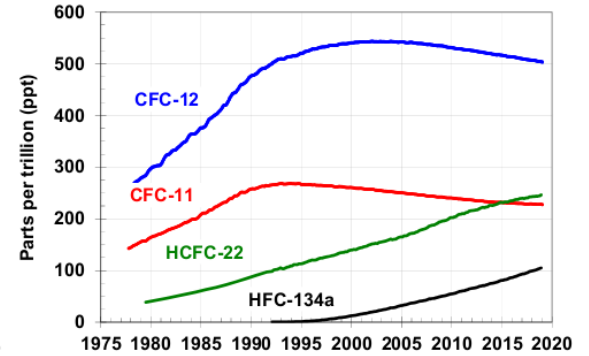
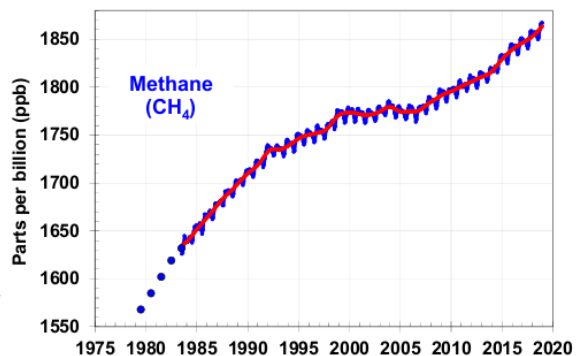
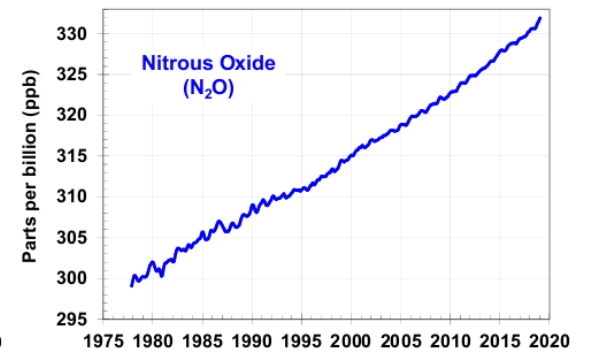
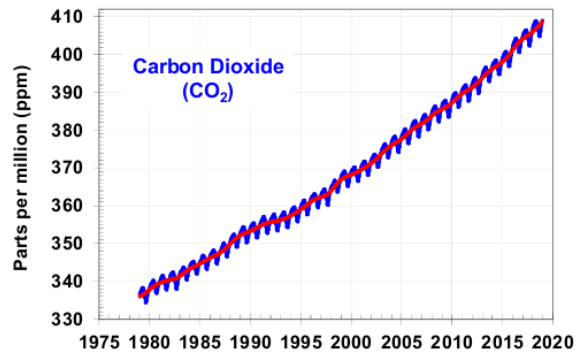


# Парниковые газы



Основные парниковые газы:  
 водяной пар  $H_2O$ ,  
 углекислый газ  $CO_2$ ,  
 метан  $CH_4$ , озон  $O_3$ ,  
 закись азота  $N_2O$ , ...

воспроизведено по  
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Парниковые\\_газы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Парниковые_газы)



# Доиндустриальный парниковый эффект

Система осреднена по году и по глобусу.

Общее уравнение

$$F_S = F_T$$

с потоком энергии от Солнца

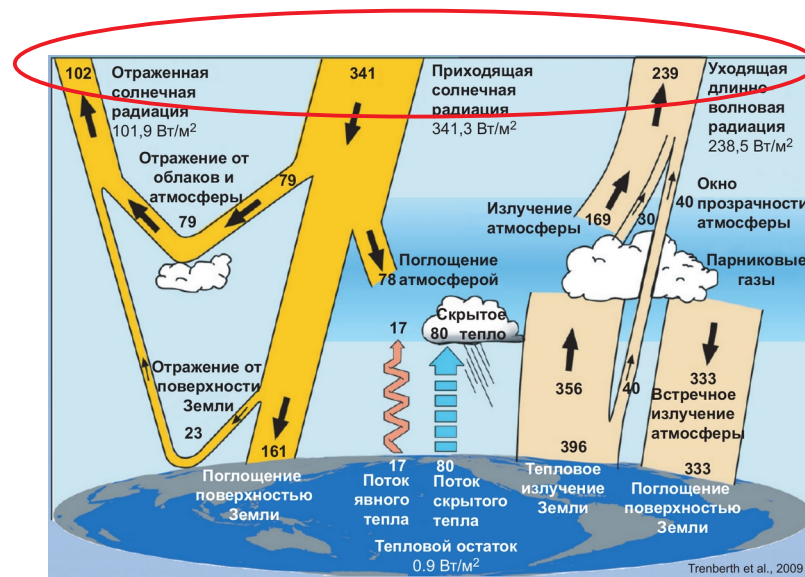
$$F_S = S_* (1 - \alpha)$$

и излучением Земли

$$F_T = \sigma T_0^4$$

$S_* = 341 \text{ Вт/м}^2$  – поток энергии от Солнца на верхней границе атмосферы,  
 $\alpha = 0,3$  – доля солнечной энергии, отражаемая в космос ("планетарное альbedo"),

$T_0$  – температура излучения ( $255 \text{ К} = -18^\circ\text{C}$ )



# Доиндустриальный парниковый эффект

Система осреднена по году и по глобусу.

Общее уравнение

$$F_S = F_T$$

с потоком энергии от Солнца

$$F_S = S_* (1 - \alpha)$$

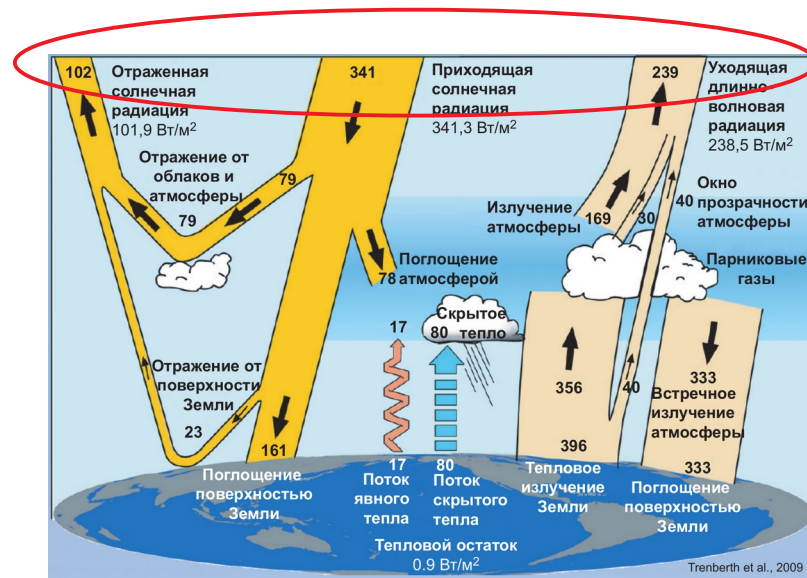
и излучением Земли

$$F_T = \sigma T_0^4$$

$S_* = 341 \text{ Вт/м}^2$  – поток энергии от Солнца на верхней границе атмосферы,  
 $\alpha = 0,3$  – доля солнечной энергии, отражаемая в космос ("планетарное альbedo"),

$T_0$  – температура излучения (255 К =  $-18^\circ\text{C}$ )

– радиационная температура Земли



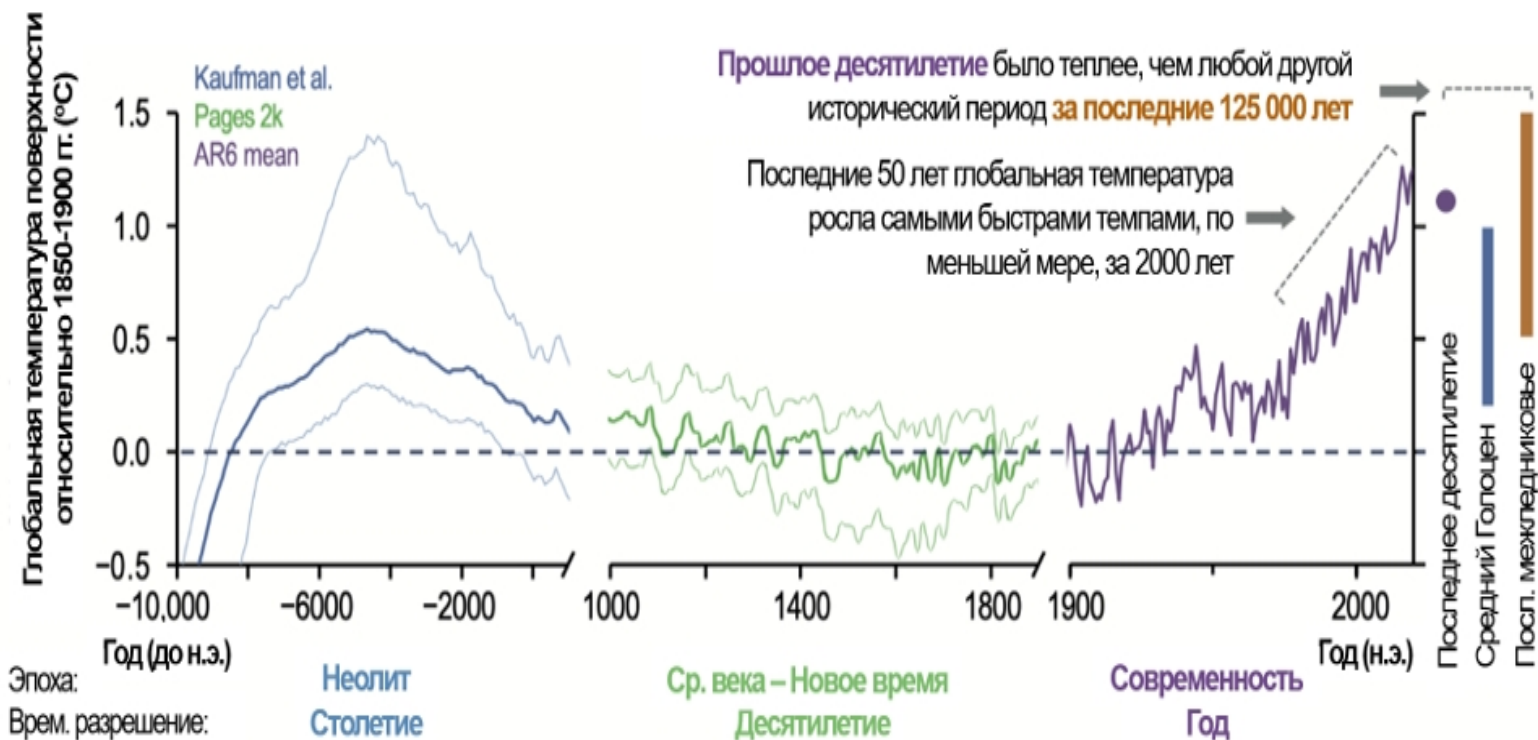
Реальная приземная температура –  $13-14^\circ\text{C}$

Разница – парниковый эффект атмосферы!

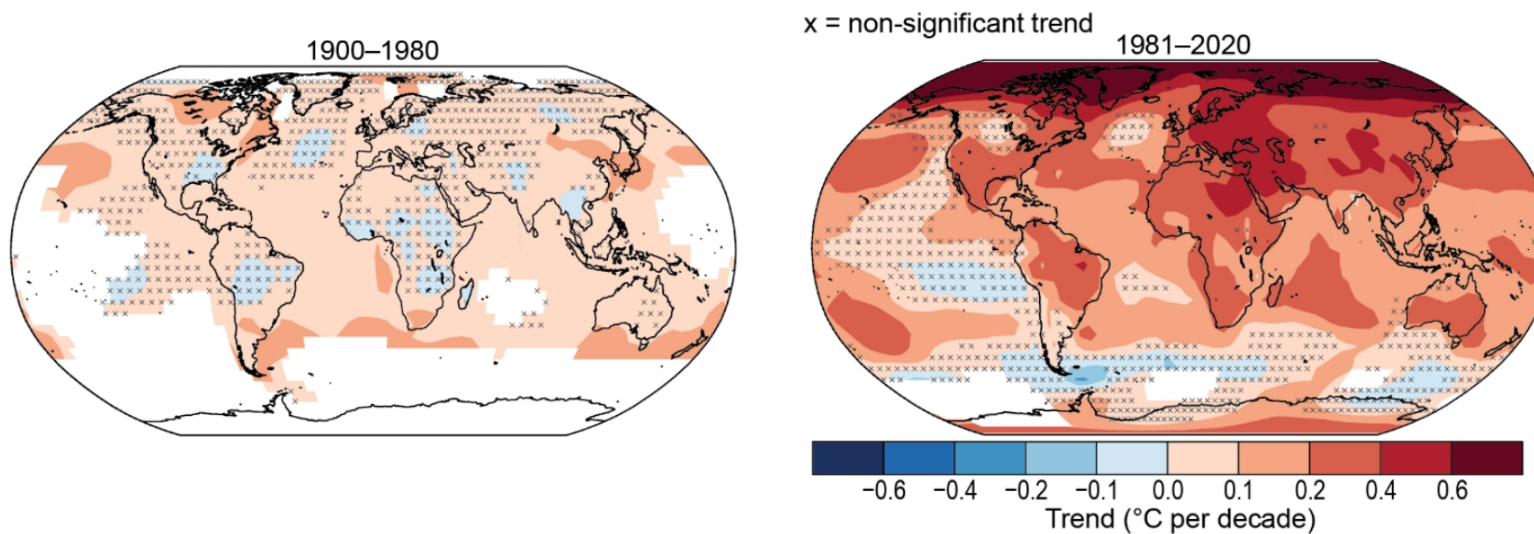
парниковый эффект существует с момента формирования атмосферы, человечество лишь усиливает его

# Среднегодовая температура приповерхностного воздуха

[ОД6 РГ1 МГЭИК, рис. 2.11]

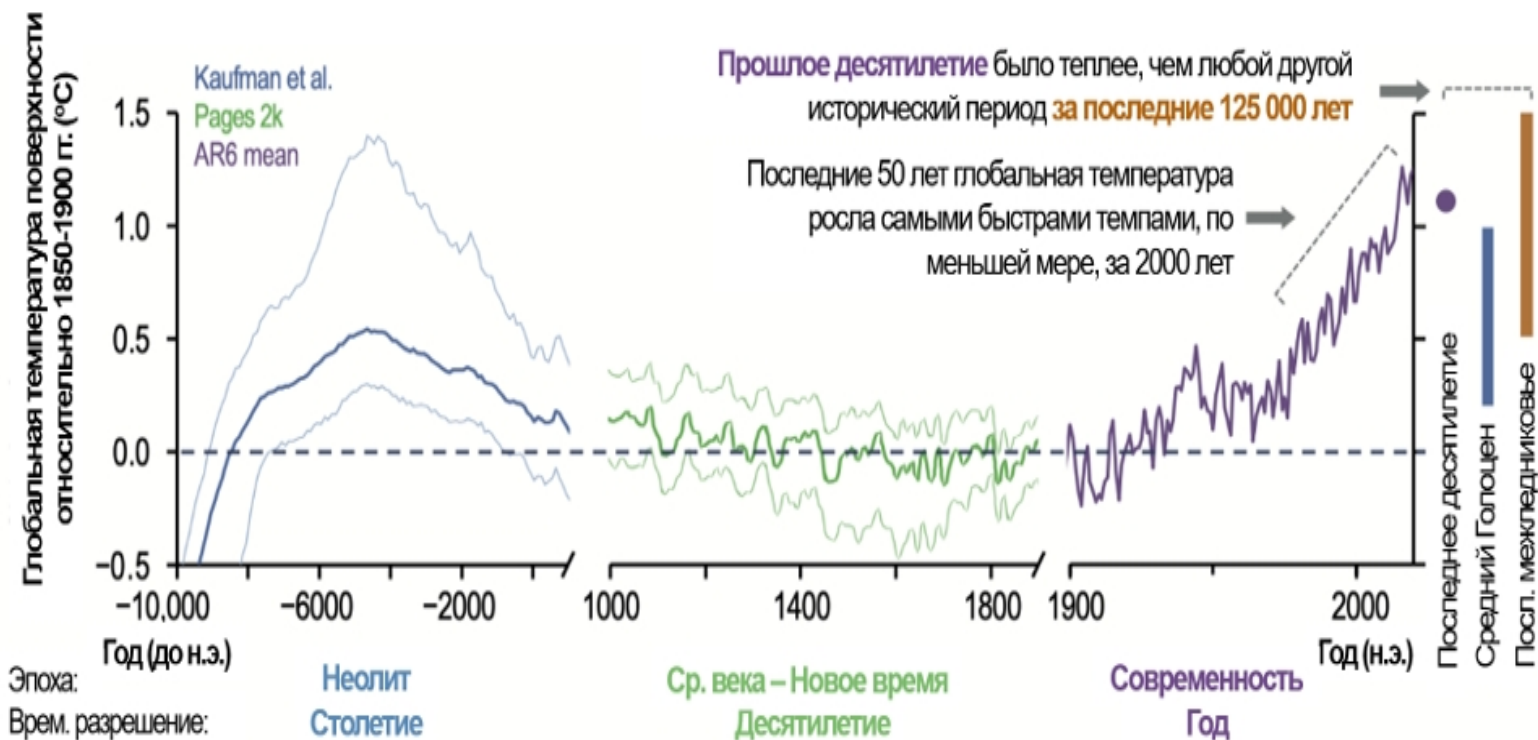


## Скорость изменения температуры («коэффициент тренда», °C/десятилетие)

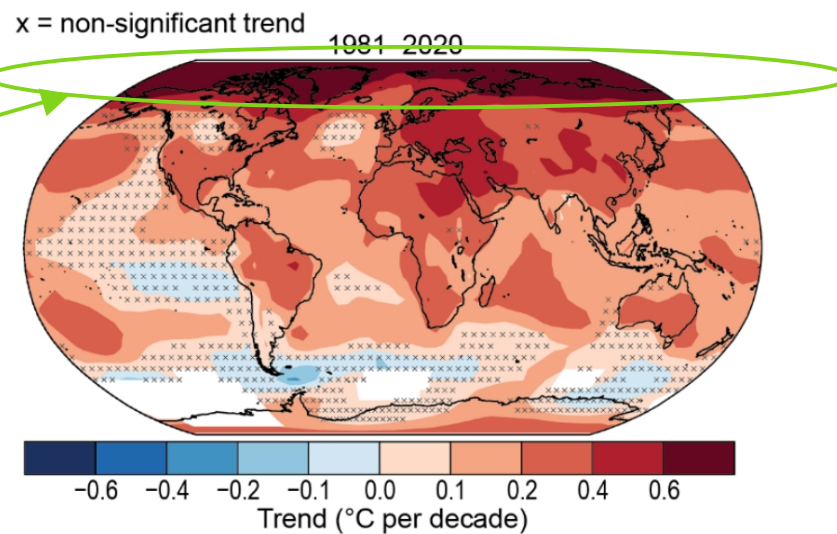
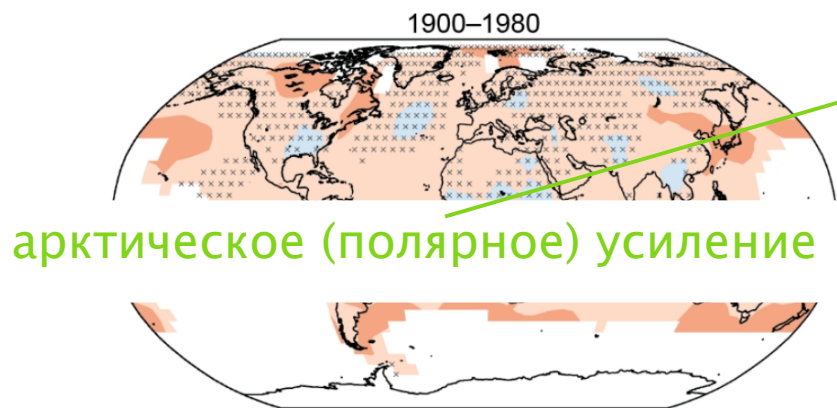


# Среднегодовая температура приповерхностного воздуха

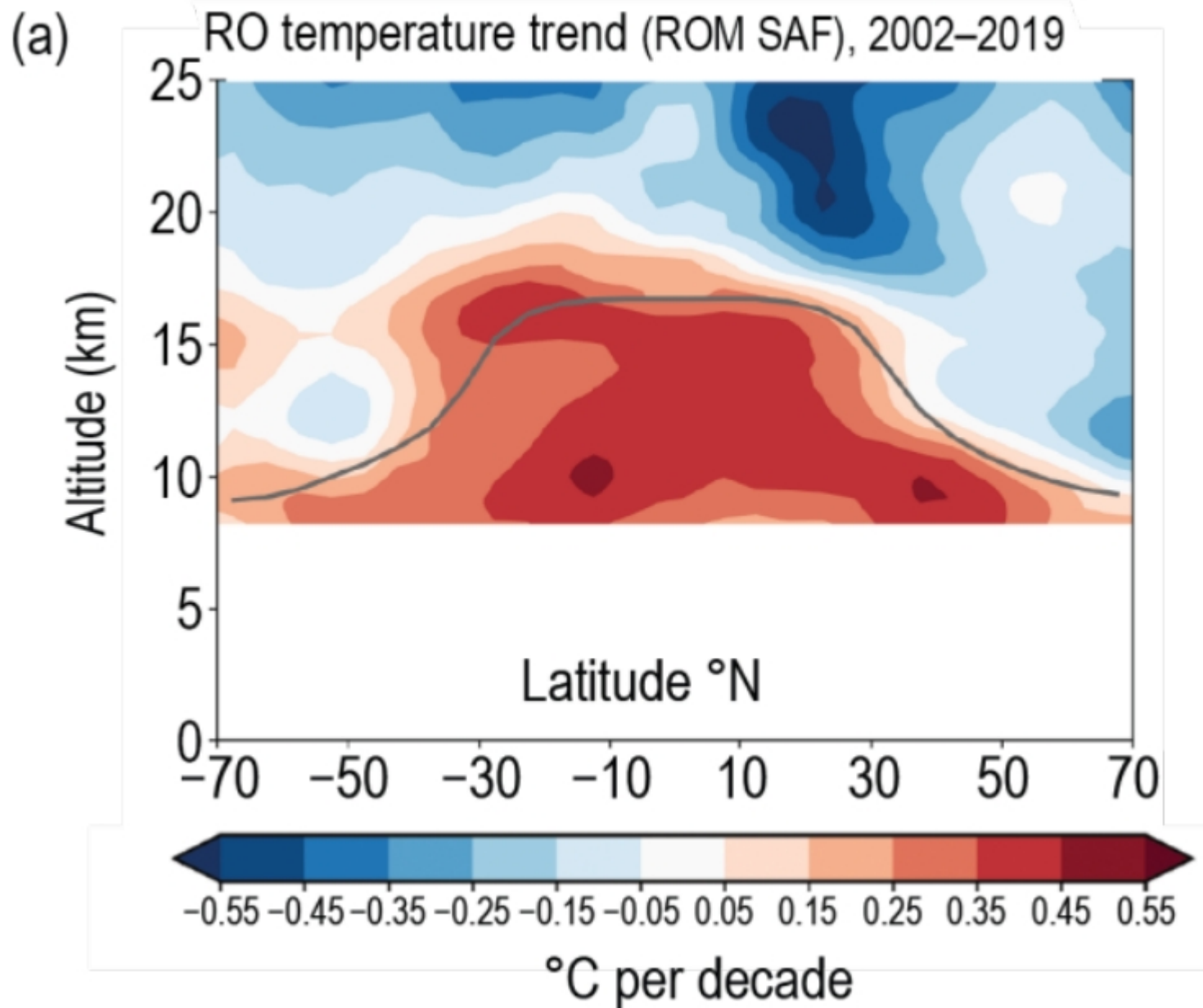
[ОД6 РГ1 МГЭИК, рис. 2.11]



Скорость изменения температуры («коэффициент тренда», °C/десятилетие)

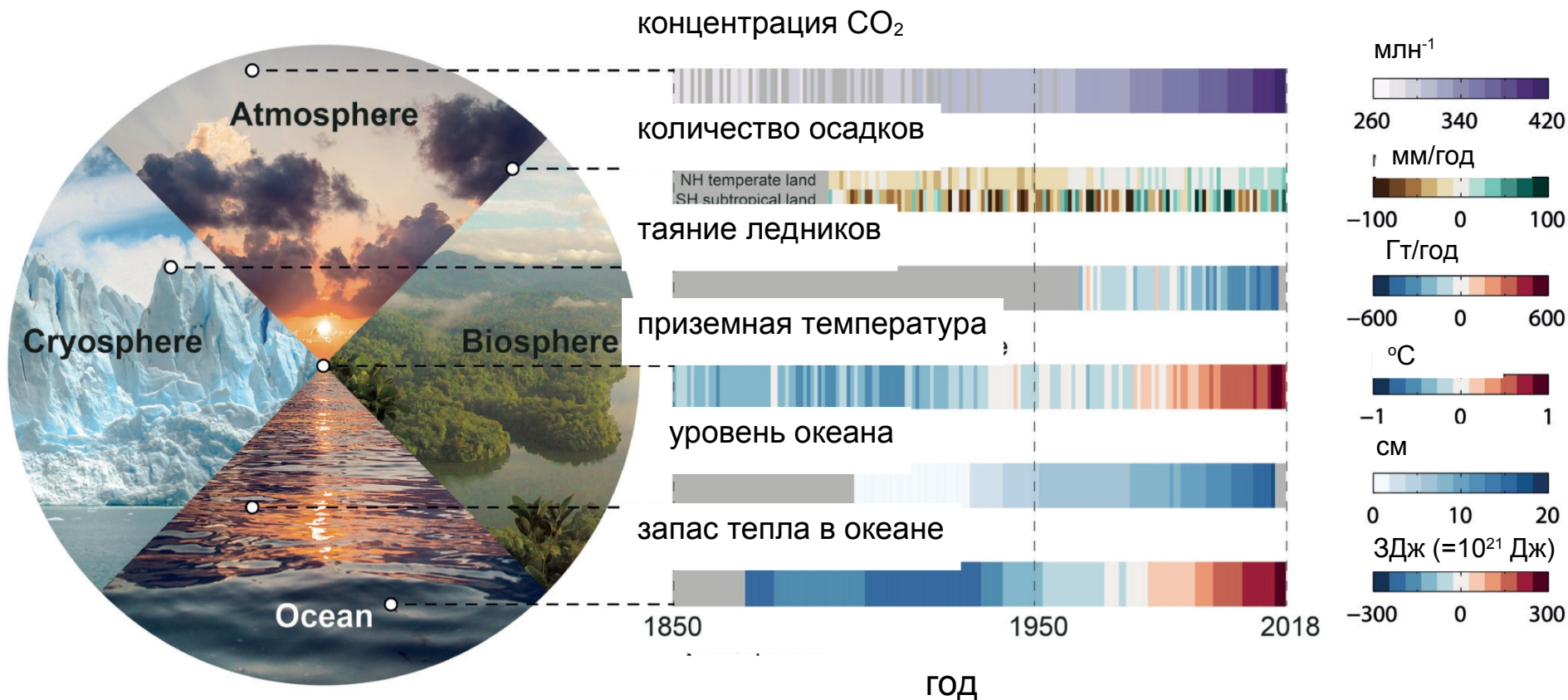


# Вертикальная структура изменений температуры [ОД6 РГ1 МГЭИК, рис. 2.12]



Единственное известное объяснение – парниковый эффект!

# Взаимное соответствие современных изменений климата [ОД6 РГ1 МГЭИК, рис. 1.4]



указаны среднегодовые значения

серый цвет - отсутствие данных

# Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг): определение

Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг) – изменение интенсивности потоков лучистой энергии (солнечной и тепловой) под влиянием внешних факторов и при фиксированном (неизменном) состоянии Земной системы

твёрдый брусок:

$$C \, d T / dt = k ( T - T_{env} ) + J(t)$$

# Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг): определение

Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг) – изменение интенсивности потоков лучистой энергии (солнечной и тепловой) под влиянием внешних факторов и при фиксированном (неизменном) состоянии Земной системы

твёрдый брусок:

$$C \, dT / dt = k ( T - T_{env} ) + J(t)$$

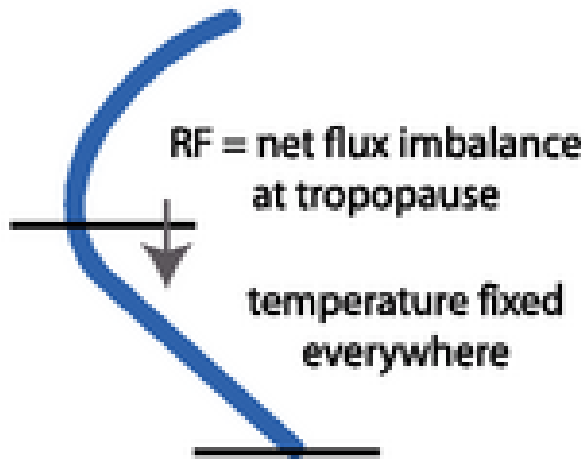
# Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг): определение

Радиационное возмущающее воздействие (радиационный форсинг) – изменение интенсивности потоков лучистой энергии (солнечной и тепловой) под влиянием внешних факторов и при фиксированном (неизменном) состоянии Земной системы

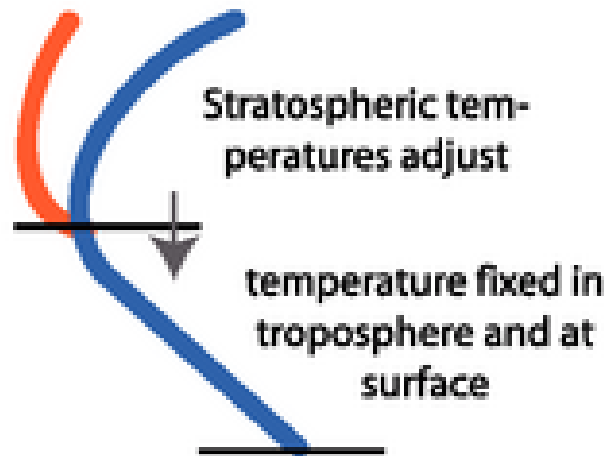
твёрдый брусок:

$$C \frac{dT}{dt} = k (T - T_{env}) + J(t)$$

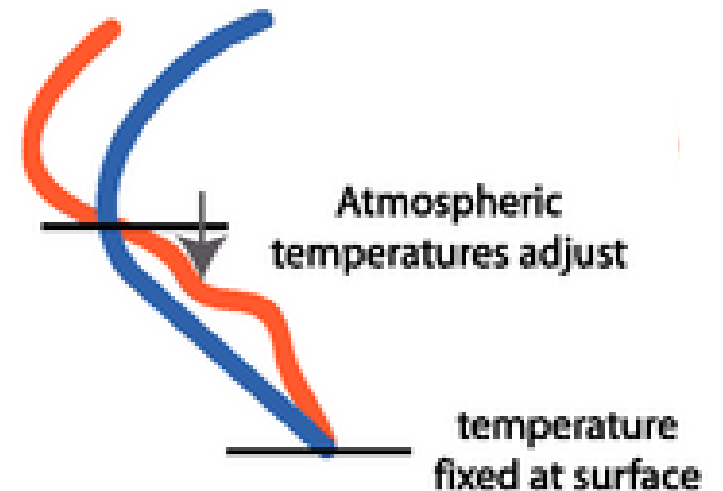
мгновенное PVB



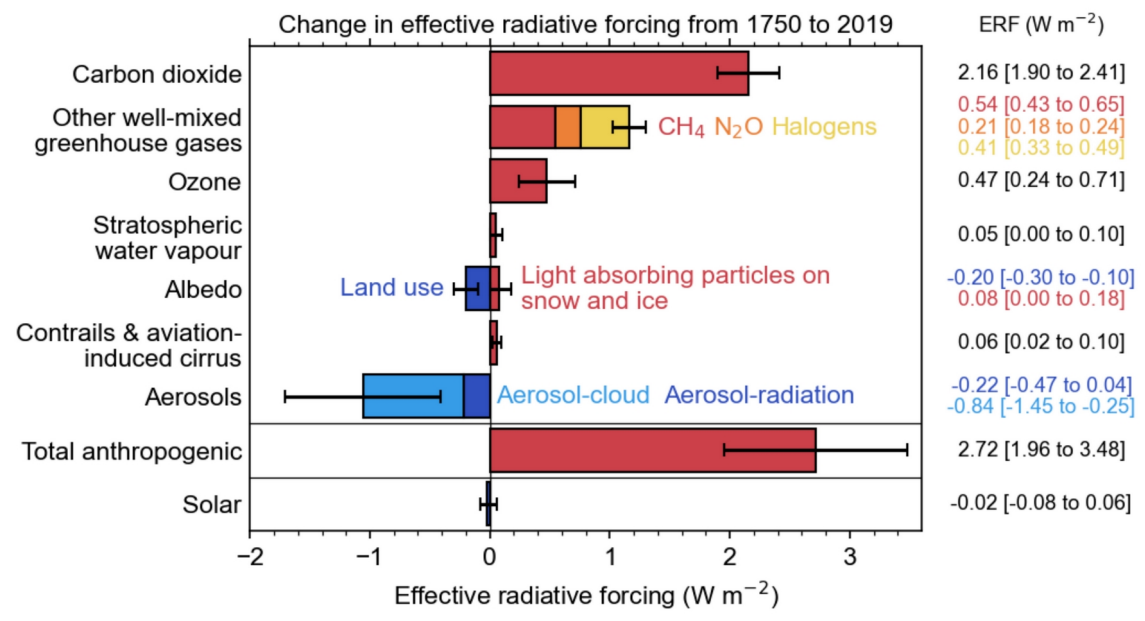
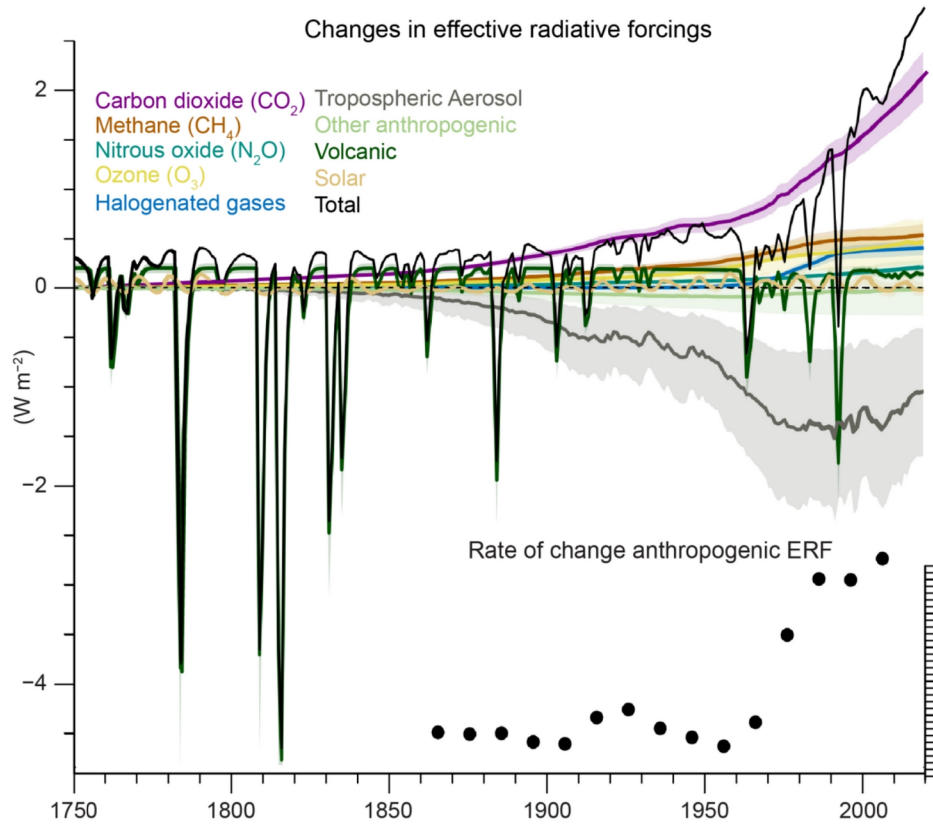
PVB после быстрой подстройки стратосферы



PVB после быстрой подстройки тропосферы (ERF – эффективное PVB)



# Основные внешние воздействия на климат за индустриальный период [IPCC WG1 AR6, рис. 2.10, 7.6]

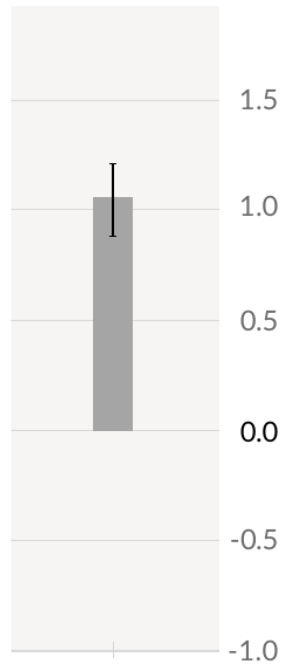


# Причины изменений климата в XX веке

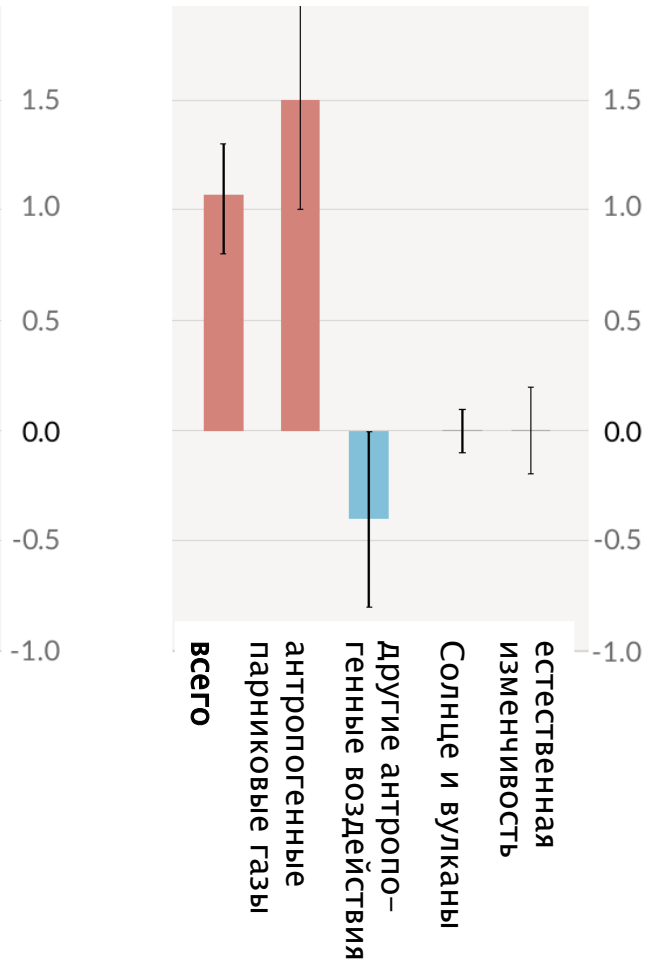
## [ОД6 РГ1 МГЭИК, рис. SPM.1 и SPM.2]

### результаты атрибуции

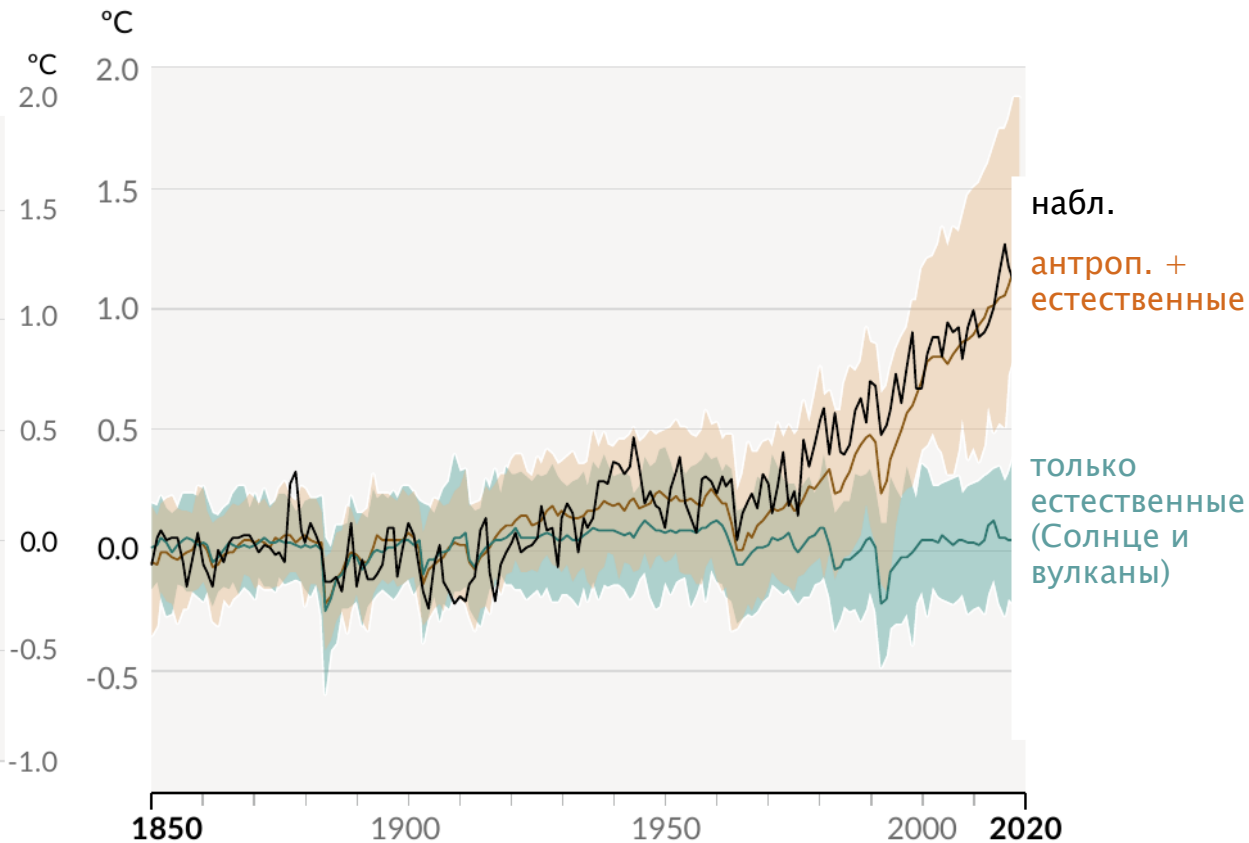
набл.  
(2010–2019 гг.) –  
(1850–1990 гг.)



вклад отдельных  
воздействий и процессов



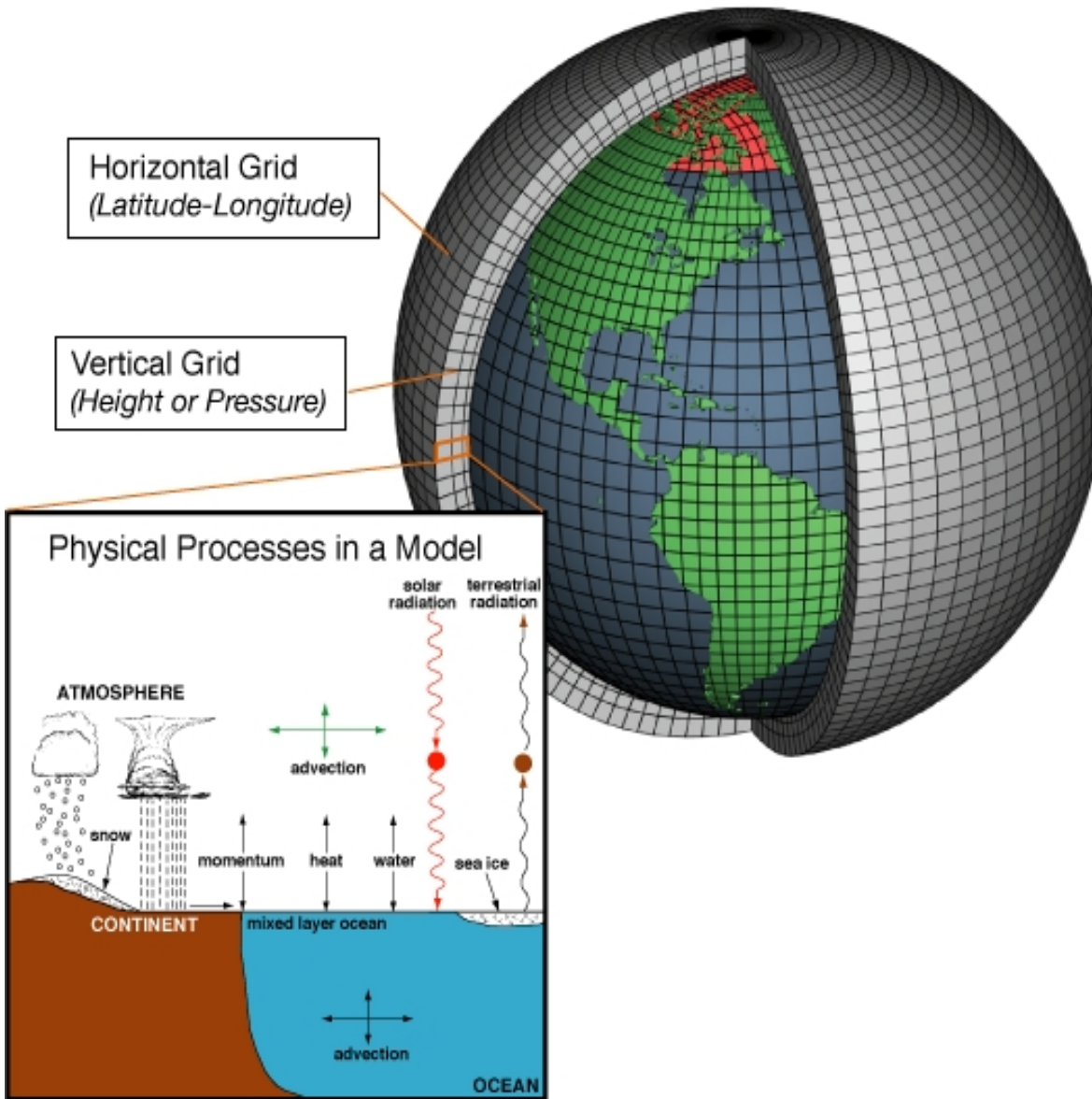
### расчёты с моделями ОД6 МГЭИК



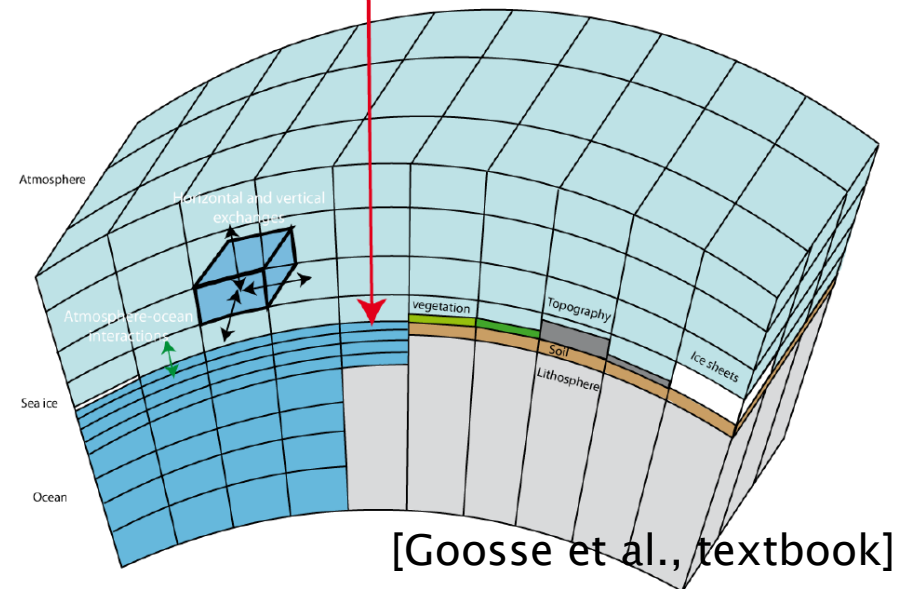
**Количественно изменения климата не удаётся объяснить без учёта антропогенного воздействия**

# Представление ЗКС в численных моделях общей циркуляции

- Основаны на законах сохранения энергии, импульса и массы
- Решается задача Коши
- Уравнения представлены на дискретной вычислительной сетке
- Наиболее детальный класс моделей в настоящее время
- Вычислительно дороги (100 модельных лет требуют ~1 нед. при использовании современного кластера)



[[http://en.wikipedia.org/wiki/General\\_circulation\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/General_circulation_model)]



[Goosse et al., textbook]

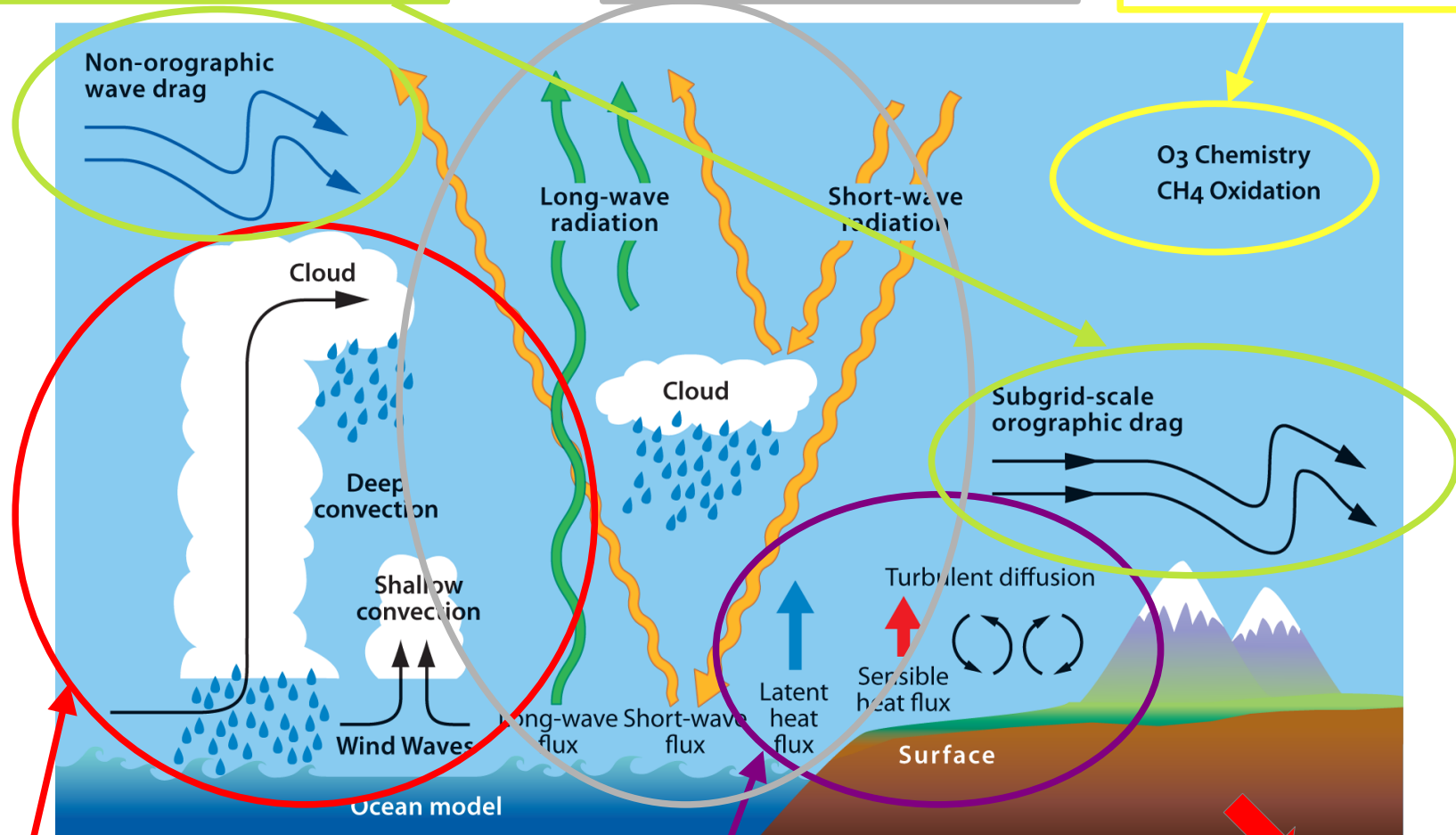
# Модели общей циркуляции: параметризации в атмосфере

Размер вычислительной ячейки по горизонтали  $\sim 10^1$  км; шаг по времени:  $\sim 10^1$  мин

мелкомасштабные волны:  
 $\leq 10^1$  мин

перенос излучения:  
 $\leq 1$  мкм,  $\leq 10^{-6}$  с

химия атмосферы:  
иногда  $\leq 10$  м,  $\leq 1$  с



конвекция:  
1–10 км,  $10^1$ – $10^2$  мин

турбулентность в нижнем 1 км:  
 $\leq 10^2$  м,  $\leq 10^2$  мин

параметризации  
(решения при ряде  
приближений)

# Обратные связи в Земной системе: общее определение

Внешнее воздействие

$\Delta F$

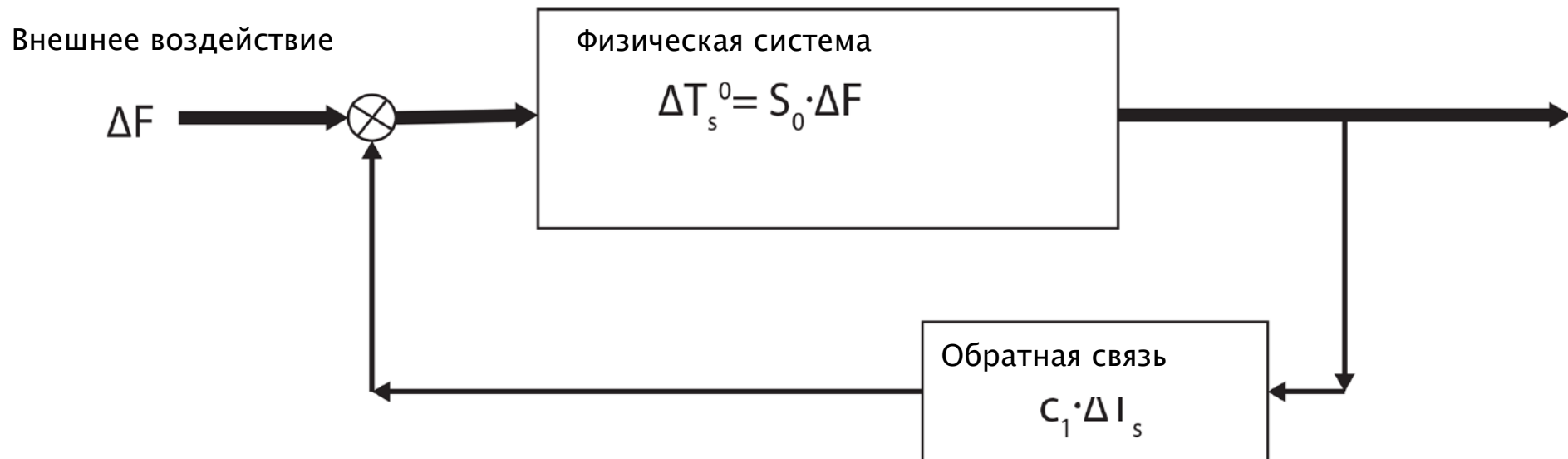


Физическая система

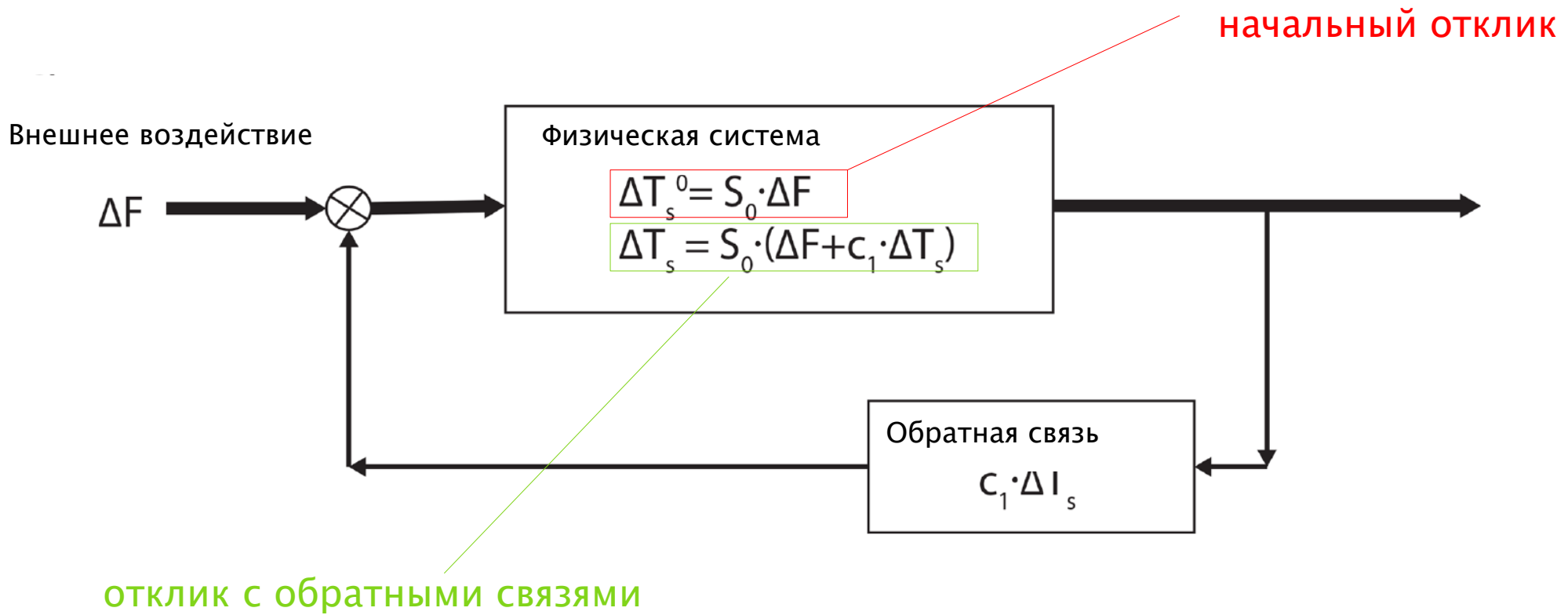
$$\Delta T_s^0 = S_0 \cdot \Delta F$$



# Обратные связи в Земной системе: общее определение



# Обратные связи в Земной системе: общее определение



# Обратные связи в Земной системе: процессы

при потеплении (для определённости):

## ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ (ОСЛАБЛЯЮЩИЕ):

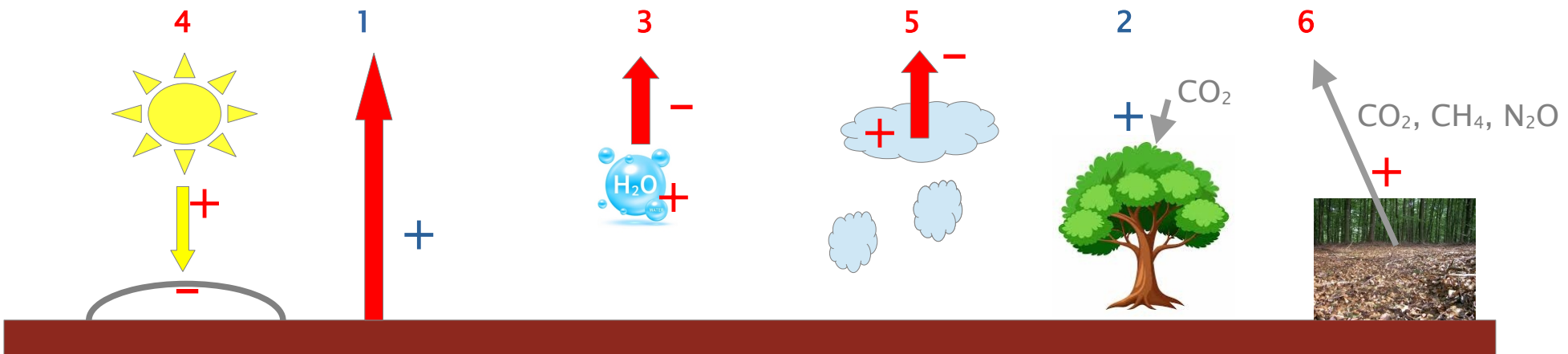
1. Увеличивается интенсивность длинноволнового (ДВ) излучения в космос
2. Увеличивается интенсивность поглощения  $\text{CO}_2$  растениями  
(эффект фертилизации, удлинение вегетационного периода)

- ...

## ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ (УСИЛИВАЮЩИЕ):

3. Увеличивается влагосодержание атмосферы (водяной пар – парниковый газ)
4. Уменьшается площадь распространения снега и льда (сильно отражающих солнечное излучение), т.е. система поглощает больше солнечной энергии
5. Увеличивается площадь покрытия высокими облаками (эффект конвекции), приводящих к парниковому эффекту
6. Больше разложение органики почвы (выделение  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ )

- ...



# модель ЗКС: приближение ЗКС как чёрного тела

Глобальное и годовое осреднение

## Сохранение энергии

$$F_S = F_T$$

поток солнечной энергии

$$F_S = S_* (1 - \alpha)$$

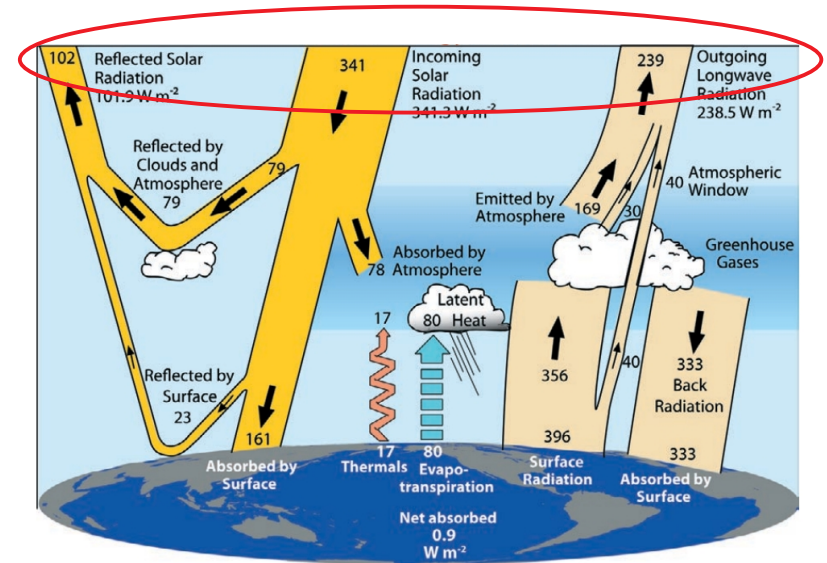
тепловое излучение Земли  
(закон Стефана–Больцмана)

$$F_T = \sigma T_0^4$$

$S_* = 341 \text{ W/m}^2$  – солнечная постоянная

$\alpha = 0.3$  – планетарное альbedo Земли

$T_0 = 255 \text{ K}$  – яркостная температура



Исходное сосотяие системы:

$$S_* (1 - \alpha) = \sigma T_0^4, \quad (1)$$

Добавляя небольшое РВВ  $\Delta R$ :

$$S_* (1 - \alpha) + \Delta R = \sigma (T_0 + \Delta T)^4, \quad (2)$$

$$(2)-(1): \quad \Delta R = 4 \sigma T_0^3 \Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \Delta R / (4 \sigma T_0^3).$$

При  $\Delta R = 3.7 \text{ Вт/м}^2$  (РВВ при удвоении содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере)

$$\Delta T = 1.0 \text{ K}$$

У поверхности (доиндустриальная приземная температура 286 K)

$$\Delta T_s = 1.1 \text{ K} = \Delta T_{\text{Planck}}$$

– планковский отклик

# Среднеглобальная модель Будыко

Глобальное и годовое осреднение  
 $T$  – приземная температура (в тропосфере находится 90% массы атмосферы, а изменения климата когерентны между собой по вертикали)

## Сохранение энергии

$$F_S = F_T$$

поток солнечной энергии

$$F_S = S_* [ 1 - \alpha(T) ],$$

$$\alpha(T) = \alpha_0 - k T$$

тепловое излучение Земли

$$F_T = A + B T.$$

(это не линеаризация для  $\sigma T^4$ , т.к.  
 $4 \sigma T^3 = 3.7 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$ )

$$\Delta T = \Delta R / ( B - S_* k )$$

[Мохов, 1993]:

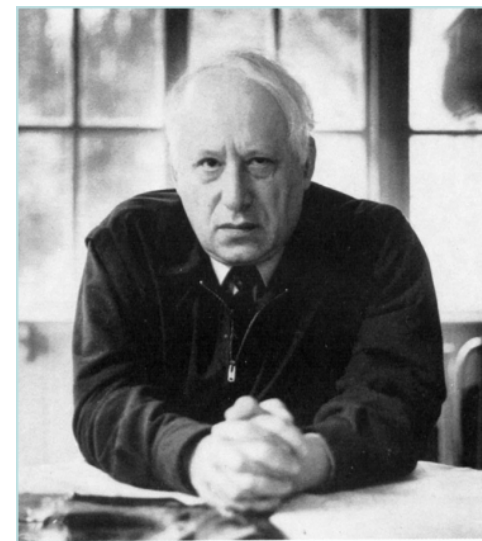
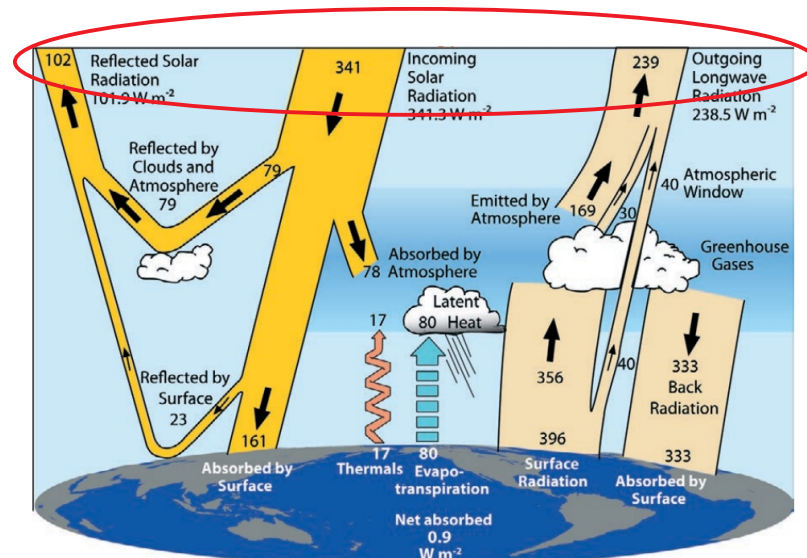
$$B = 1.8 \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$$

$$k = (2-3) \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

$$\text{При } \Delta R = 3.7 \text{ Вт/м}^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta T \approx 3.5 \text{ К}$$

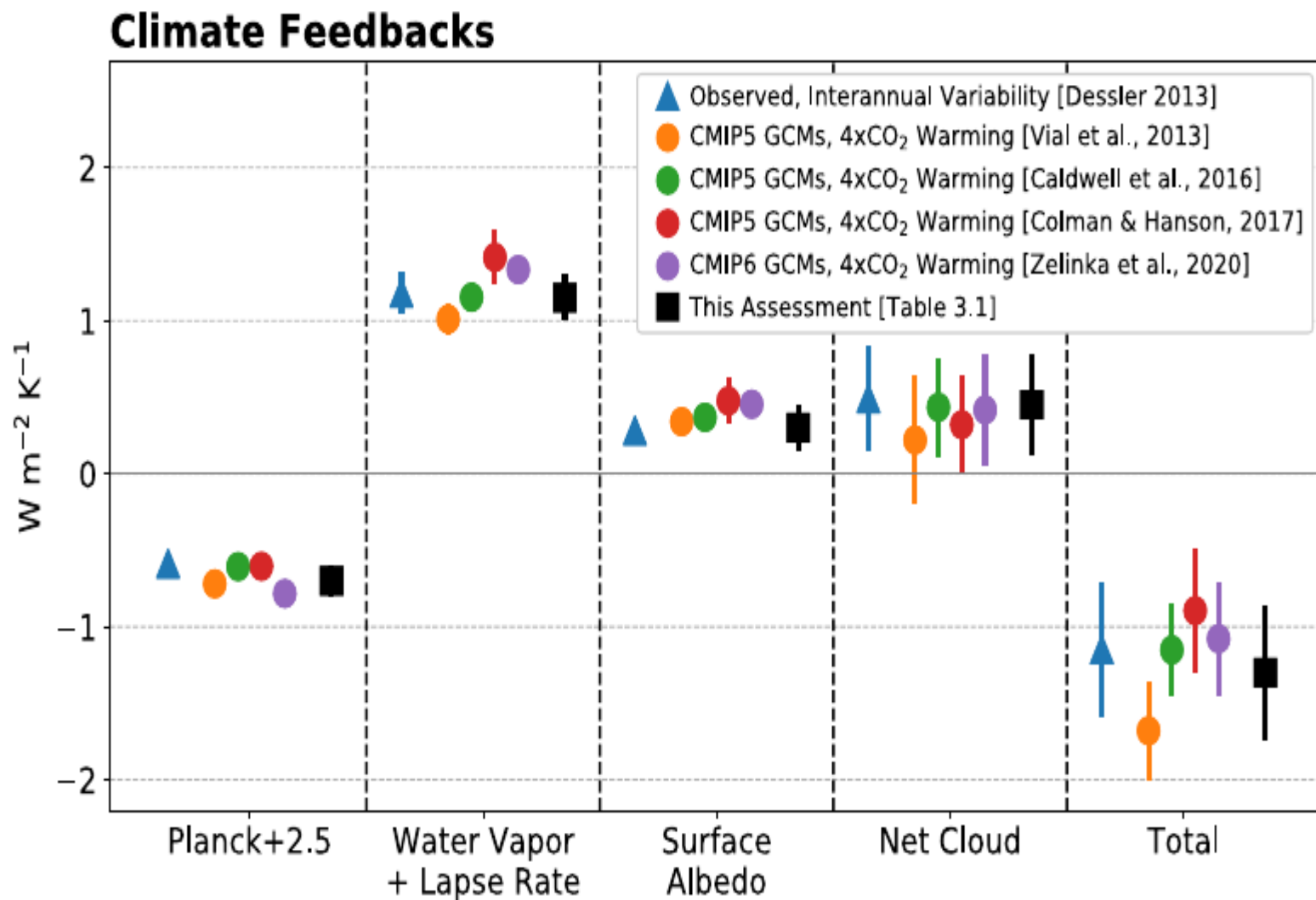
Коэффициент усиления:

$$f_g = \Delta T / \Delta T_{\text{Planck}} = 3.5 \text{ К} / 1.1 \text{ К} = 3.2$$

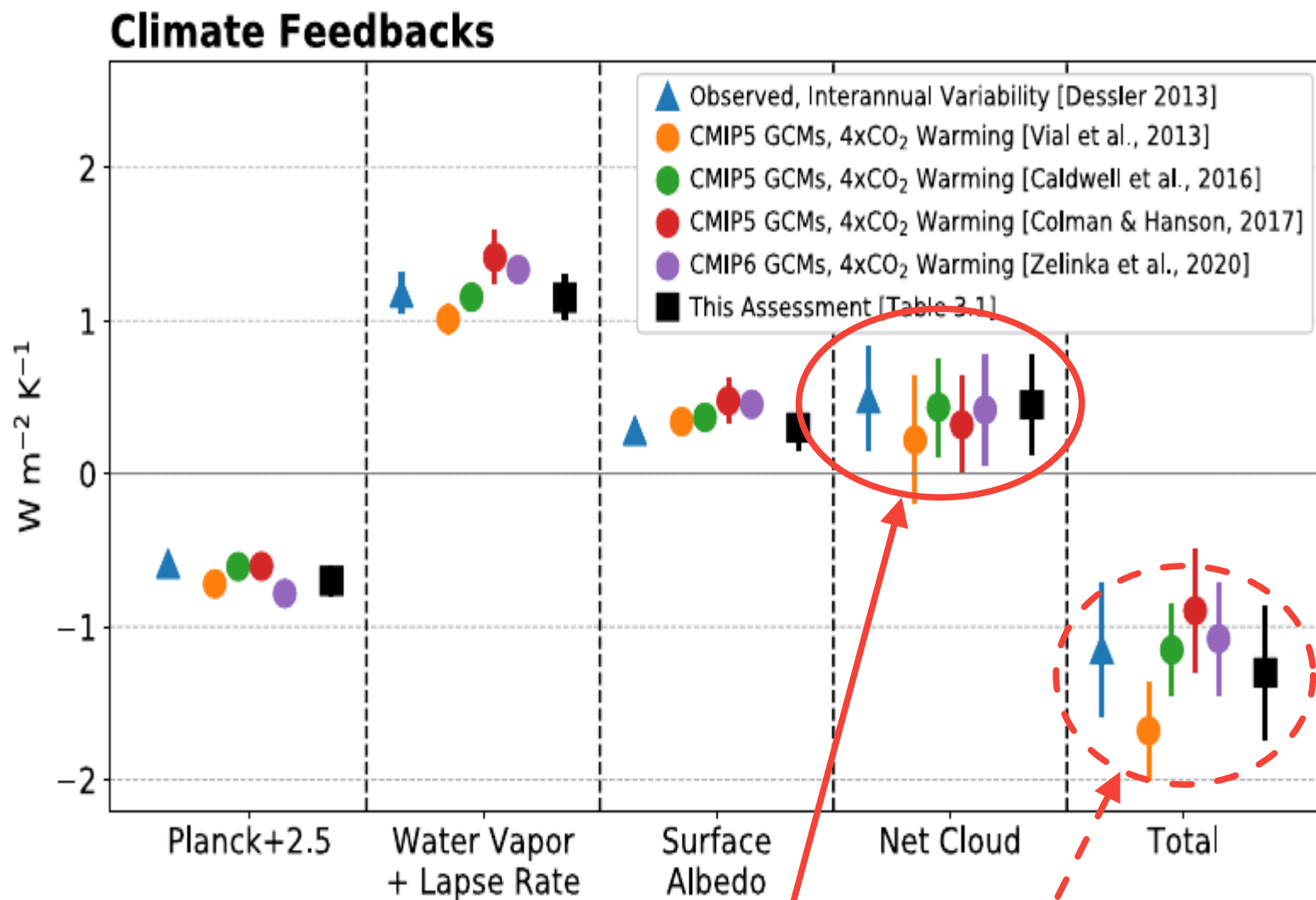


М.И. Будыко

# Физические обратные связи в климате: модели CMIP5 и CMIP6 [Sherwood et al., 2020]



# Физические обратные связи в климате: модели CMIP5 и CMIP6 [Sherwood et al., 2020]



наибольший межмодельный разброс

# Характеристики чувствительности климата

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

При  $R = \text{const}$  и  $T(0)=0$  решение

$$T(t) = (R / \lambda) [1 - \exp(-\lambda t / C)]$$

Равновесная чувствительность (ECS, equilibrium climate sensitivity) – увеличение глобально осреднённой среднегодовой приземной температуры (ГОСПТ) при удвоении содержания  $\text{CO}_2$

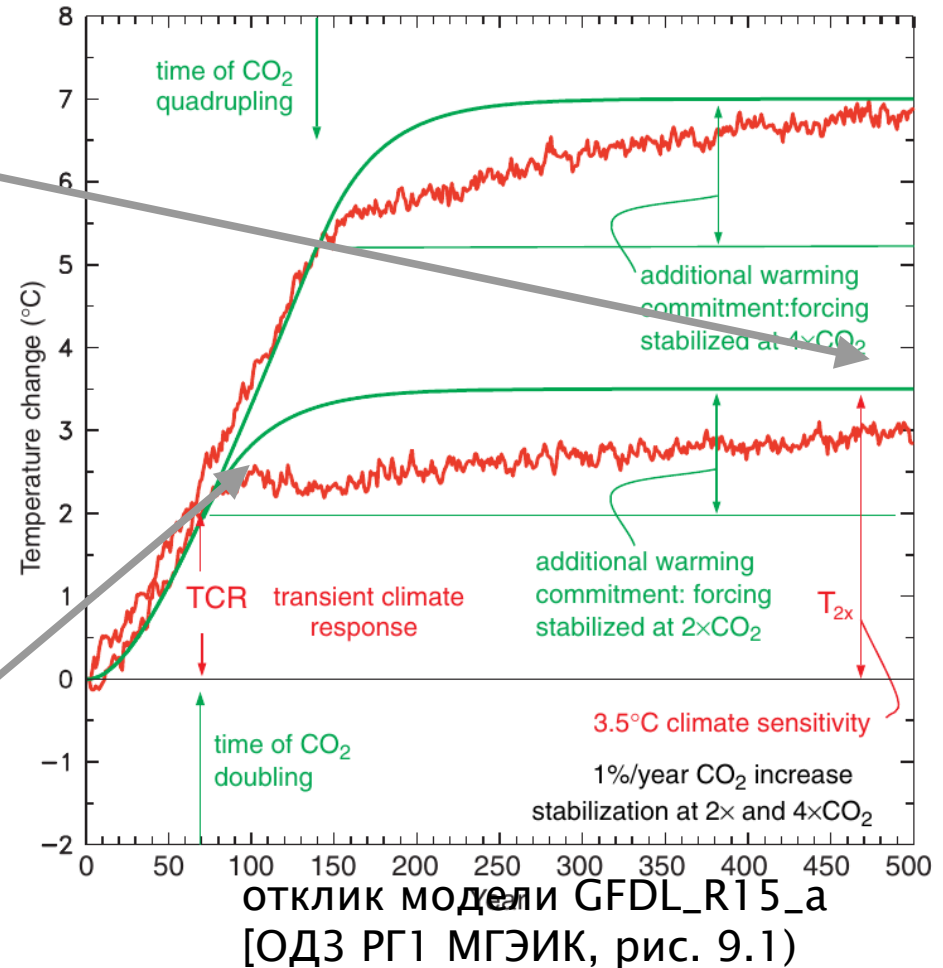
$q_{\text{CO}_2}$  в атмосфере при  $t \rightarrow \infty$

$$T_{2x} = R_{2x} / \lambda$$

(при учетверении  $q_{\text{CO}_2}$  равновесный отклик равен  $2 \cdot T_{2x}$ )

Неравновесный отклик климата (TCR, transient climate response) – изменение ГОСПТ в момент удвоения  $q_{\text{CO}_2}$  при увеличении  $q_{\text{CO}_2}$  на 1%/год ( $t_{2x} = 71$  год)

$$\text{TCR} = (R_{2x} / \lambda) [1 - \exp(-\lambda t_{2x} / C)] < T_{2x}$$



# Предсказуемость изменений погоды и климата

предел  
предсказуемости  
погоды

погода

?

климат

0

2 нед.

1 год

10 лет

заблаговременность прогноза

Предсказуемость первого рода:

Возможность предсказать состояние системы, исходя из **состояния в текущий момент времени** и физических законов, определяющих поведение системы

Предсказуемость второго рода:

Возможность предсказать состояние системы, исходя из **изменения во времени внешних воздействий на неё** и физических законов, определяющих поведение системы

# А что дальше?

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

Предположения о развитии экономики, технологий и общества

### **SSP1: Taking the Green Road:**

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

**SSP2: Middle of the road**  
Сохранение регионального  
неравенства,  
неравномерное движение к  
"зелёным технологиям"

**SSP3: Regional rivalry:**  
Низкие вложения в развитие  
общества и технологий

**SSP5: Taking the Highway:**  
Развитие с интенсивным  
использованием ископаемого  
топлива,

**SSP4: Inequality:**  
Разделение стран на  
"успешные" и "отсталые",  
медленный переход к  
низкоуглеродной энергетике

- 
- Выход за пределы естественных наук (нужны экономика, социология);
  - Выбираются сценарии, представительные для данного набора предположений;
  - Вероятность реализации каждого из сценариев неизвестна.

# А что дальше?

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

Предположения о развитии экономики, технологий и общества

### SSP1: Taking the Green Road:

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

### SSP2: Middle of the road

Сохранение регионального  
неравенства,  
неравномерное движение к  
"зелёным технологиям"

### SSP3: Regional rivalry:

Низкие вложения в развитие  
общества и технологий

### SSP5: Taking the Highway:

Развитие с интенсивным  
использованием ископаемого  
топлива,

### SSP4: Inequality:

Разделение стран на  
"успешные" и "отсталые",  
медленный переход к  
низкоуглеродной энергетике

- Выход за пределы естественных наук (нужны экономика, социология);
- Выбираются сценарии, представительные для данного набора предположений;
- Вероятность реализации каждого из сценариев неизвестна.

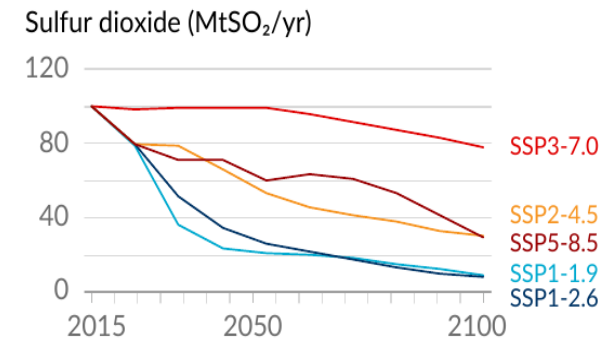
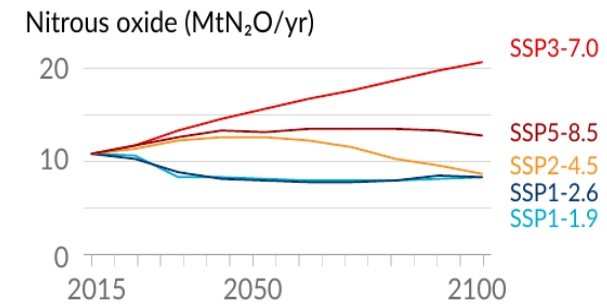
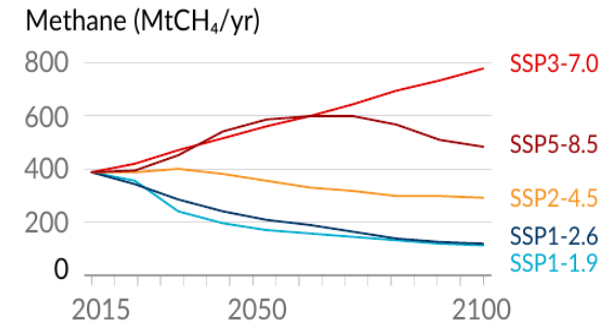
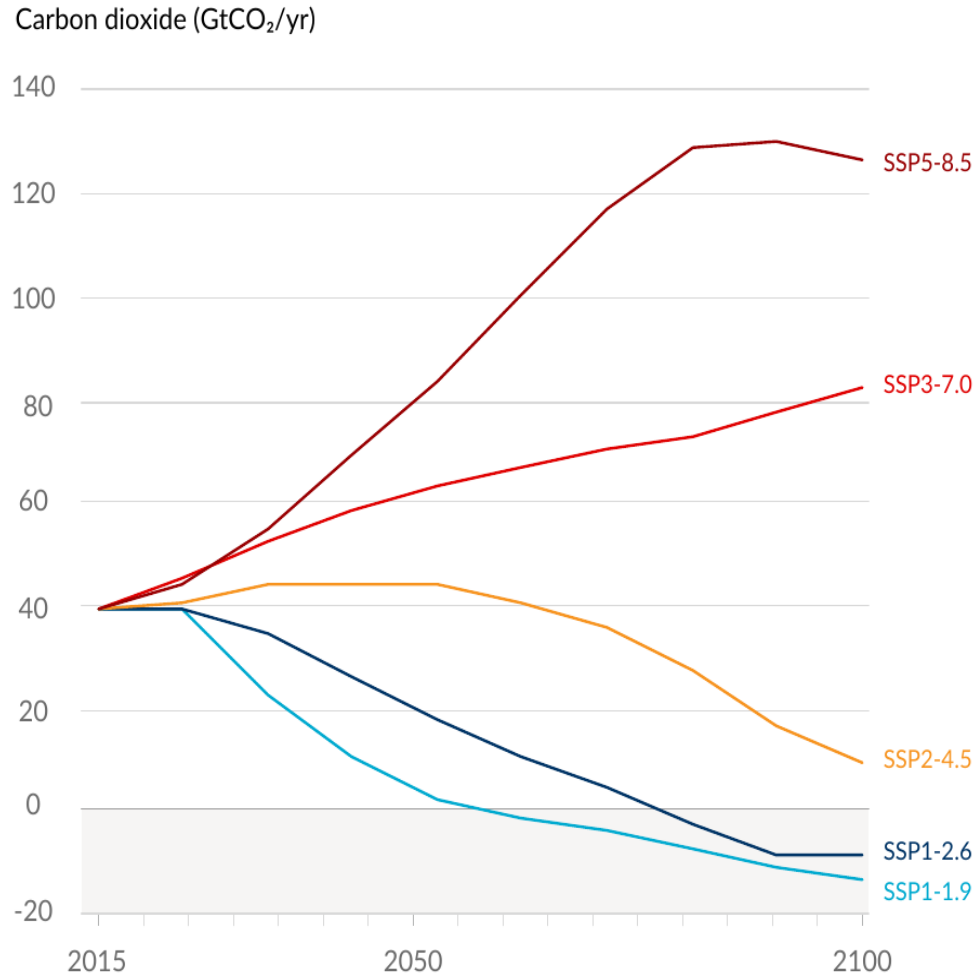
### Смысл:

- 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)

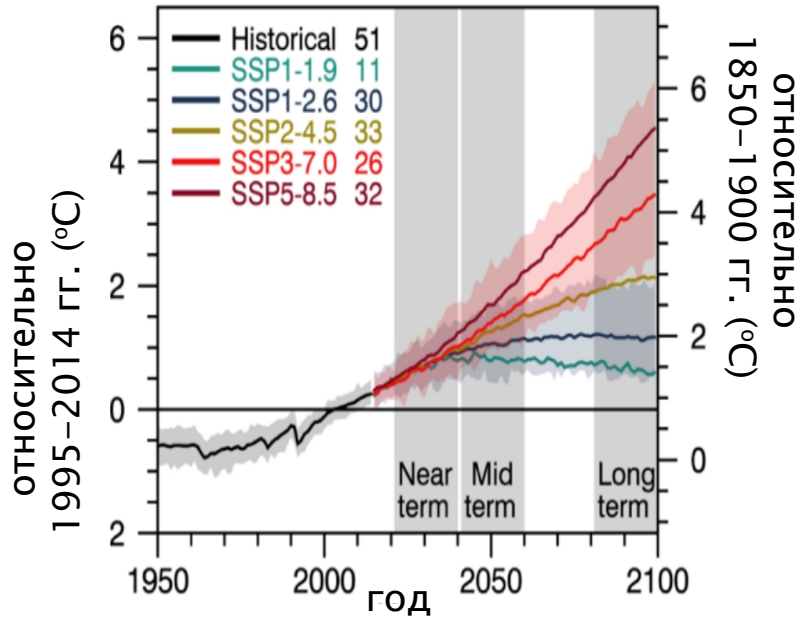
Предположения о развитии экономики, технологий и общества



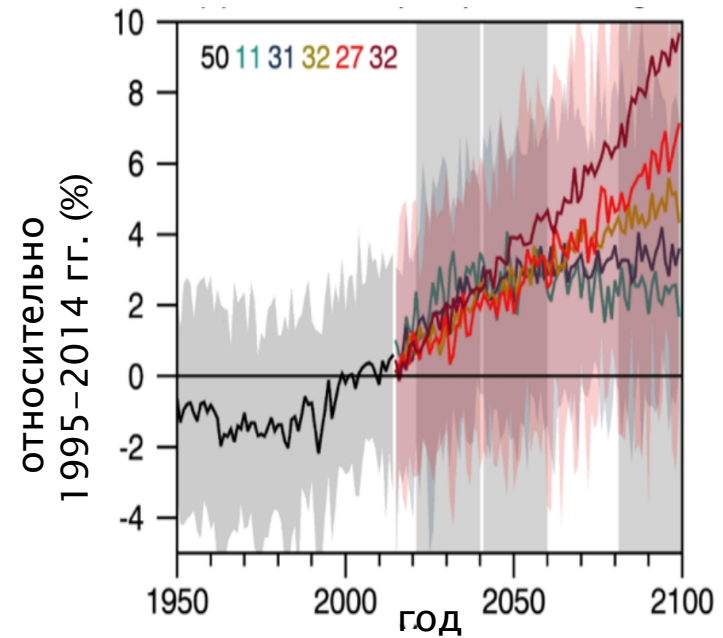
Неопределённость прогноза не может быть меньше неопределённости сценариев воздействий на Земную систему

# Среднеглобальные оценки будущих изменений климата (ОД6 МГЭИК)

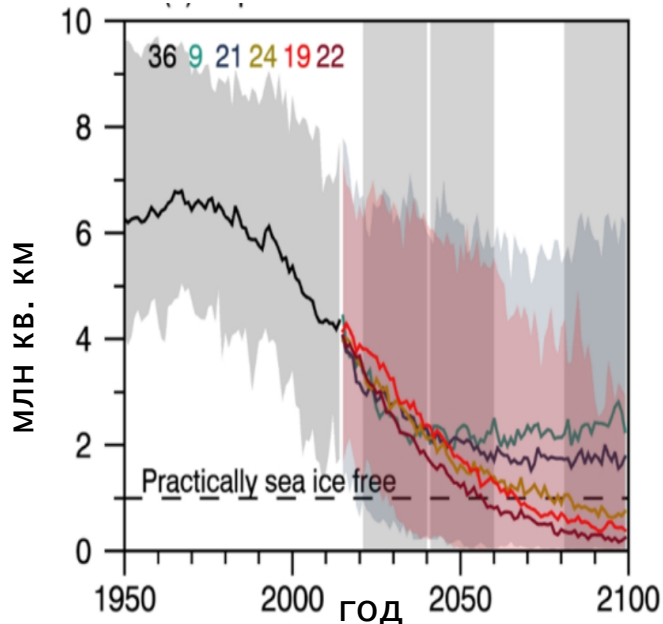
## изменение приземной температуры



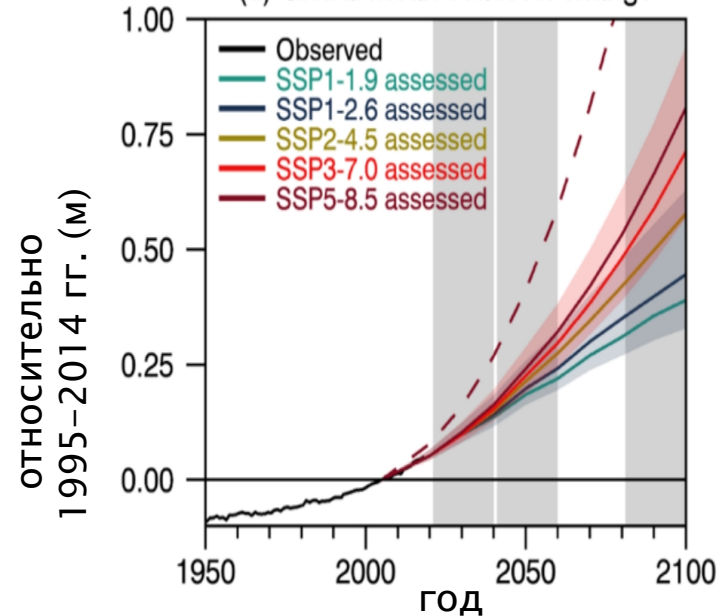
## количество осадков над сушей



## площадь льда в Арктике в сентябре



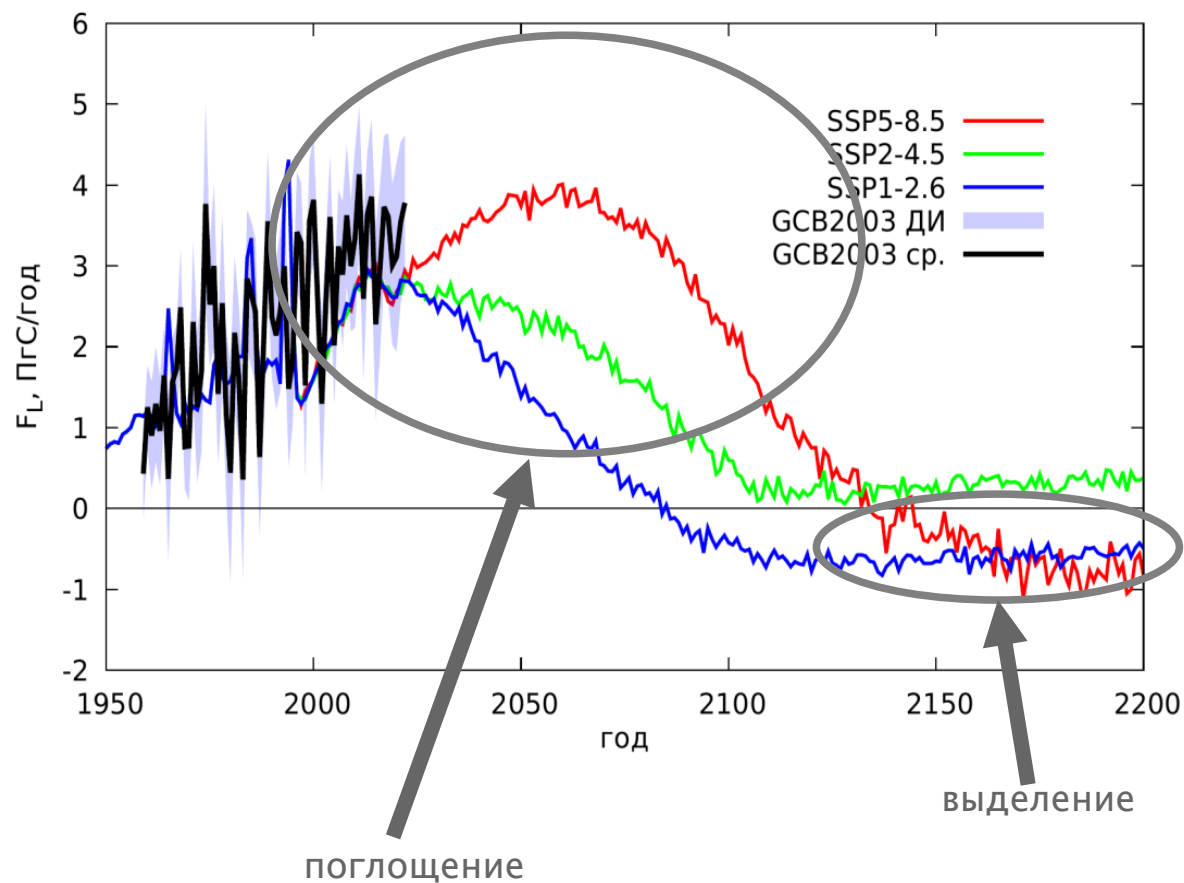
## уровень океана



# Взаимодействие климата и биогеохимии (на примере углеродного цикла)

МЗС ИФА РАН, расчёты с сценариями IPCC AR6 [Елисеев и др., 2025]

поглощение  $\text{CO}_2$  наземными экосистемами [ПгС/год]



# Критические элементы (tipping elements) ЗКС

Глоссарий МГЭИК:

Критические точки – это состояния, при переходе через которые ЗКС реорганизуется, часто резко, и не возвращается к первоначальному состоянию, даже если прекратили действовать движущие факторы данного изменения.

Критические элементы – подсистемы ЗКС, где могут существовать критические точки

Определяются:

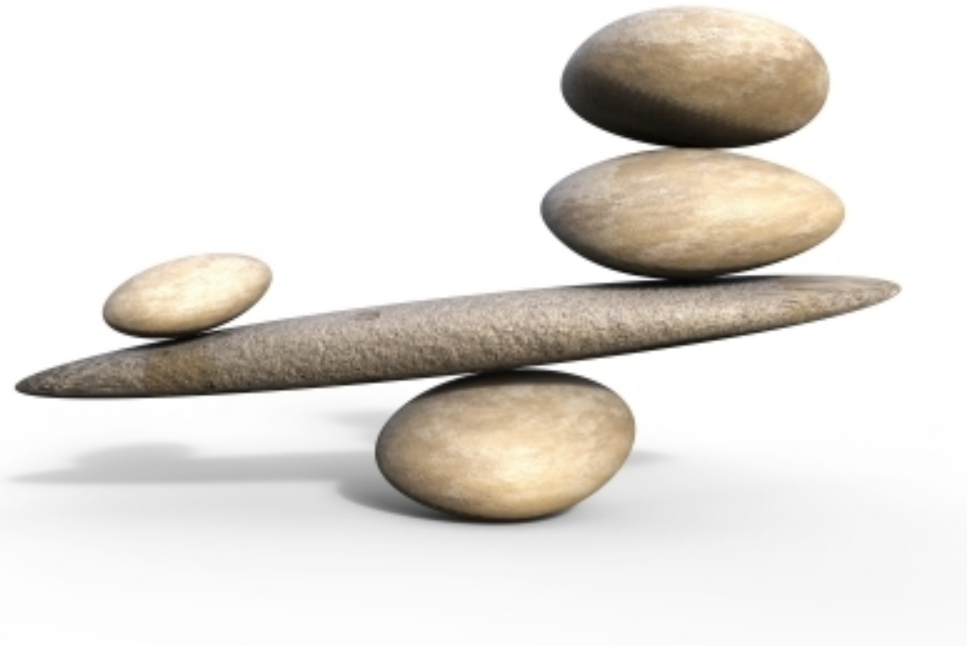
- набором климатических показателей, связанных с данным процессом (температура, осадки, перенос вещества)
- переходом показателя через пороговое значение (известны плохо);
- временем перехода

в новое состояние:

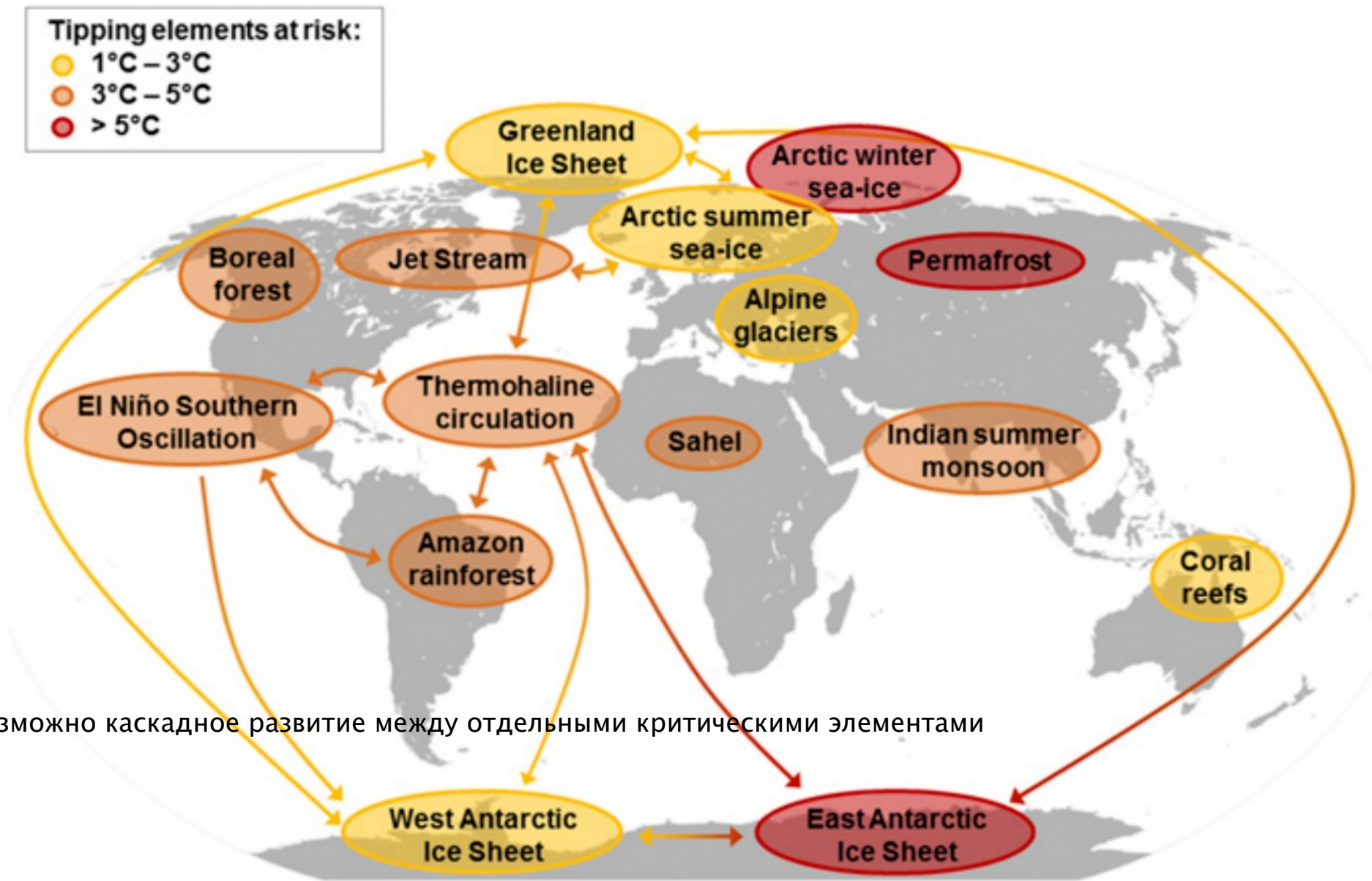
быстрое:  $\lesssim 10$  лет,

умеренное:  $\lesssim 100$  лет,

медленное:  $\gtrsim 100$  лет;

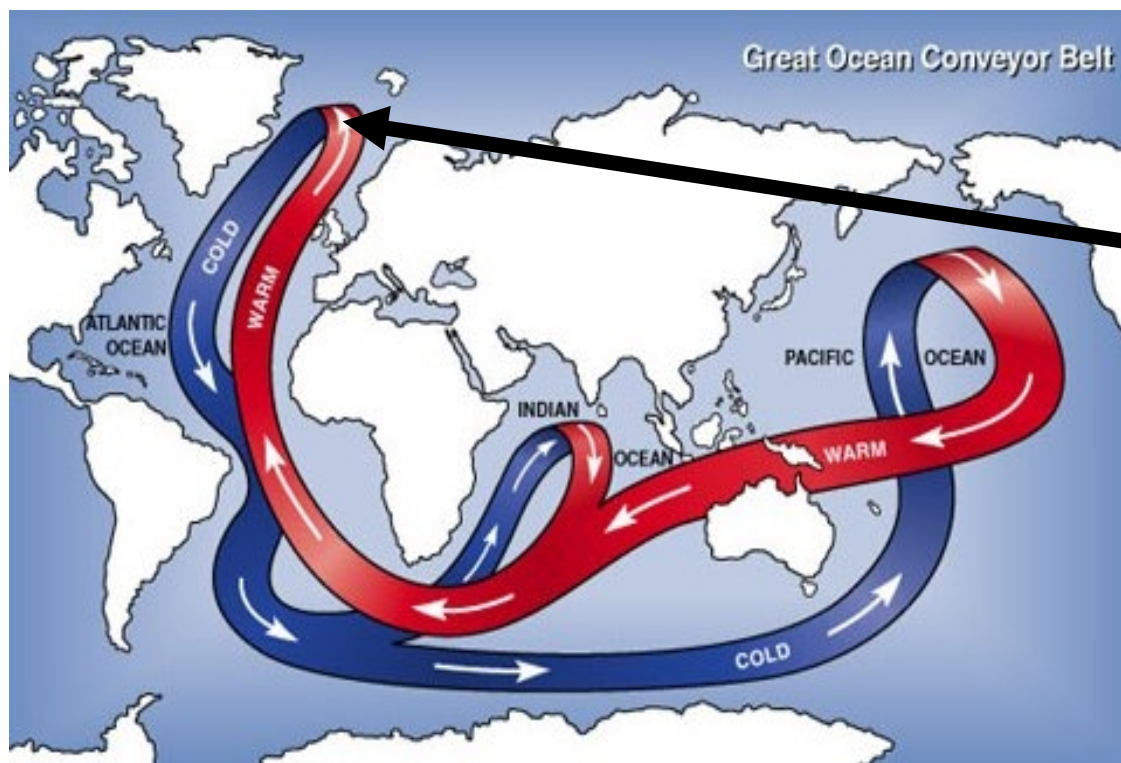


# Критические элементы ЗКС: примеры [Steffen et al., 2018]



возможно каскадное развитие между отдельными критическими элементами

# Возможность существования множественных состояний равновесия (на примере «океанического конвейера») (1)

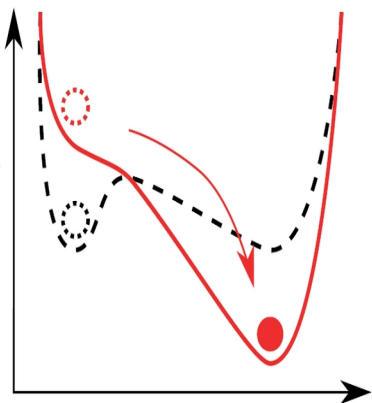


чувствителен к притоку пресной воды в регионе Гренландии



при возможном таянии Гренландского ледникового щита возможен коллапс Гольфстрима

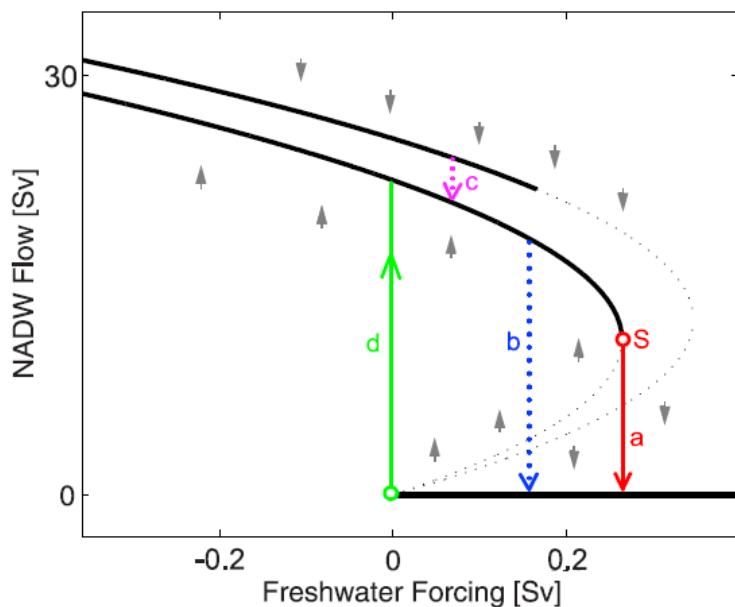
# Возможность существования множественных состояний равновесия (на примере «океанического конвейера») (2)



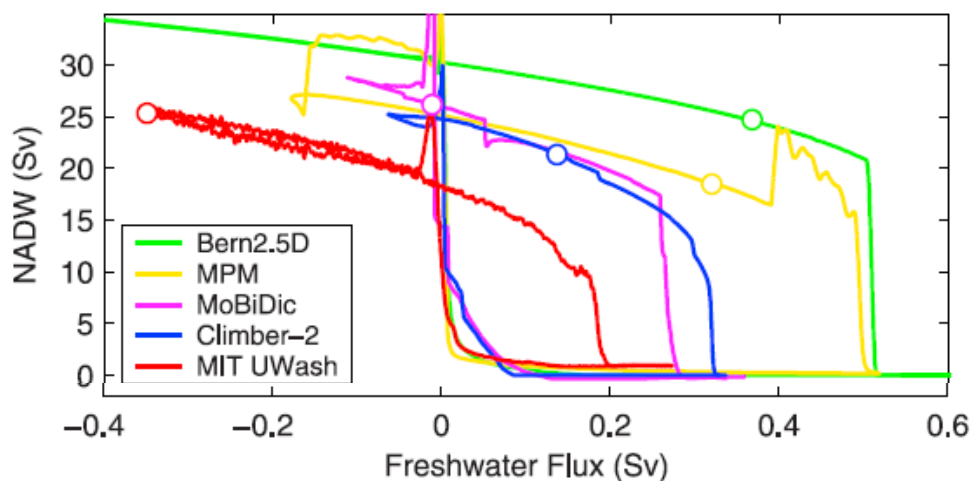
у системы могут быть одно или более положений равновесия, устойчивость которых зависит от внешнего параметра (здесь – от интенсивности притока пресной воды в верхний слой океана вблизи Гренландии)

## Результаты расчётов с искусственным потоком пресной воды из атмосферы в Северную Атлантику [Rahmstorf et al., 2005]

ожидаемый результат



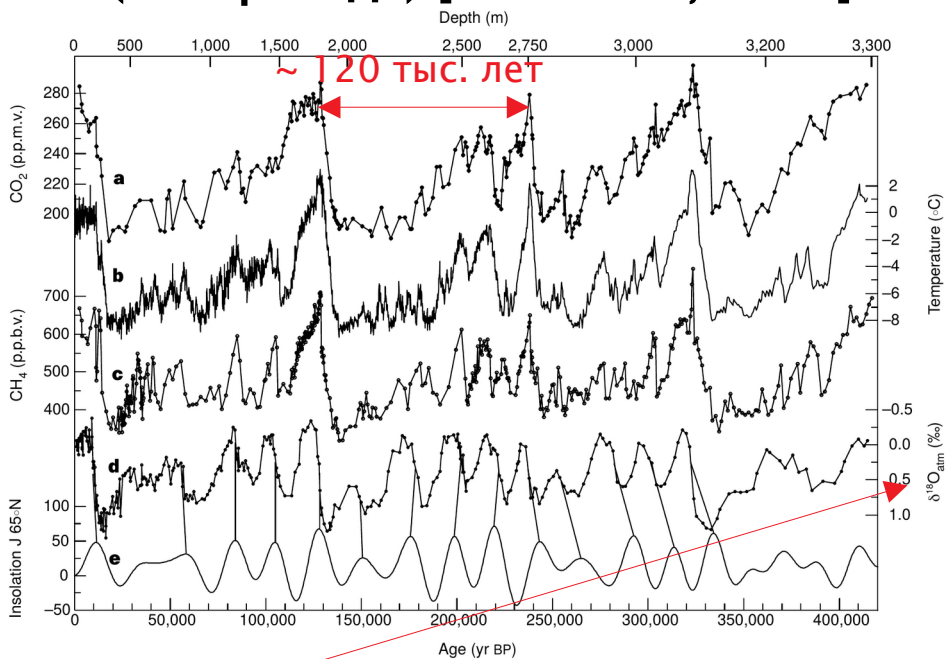
результаты численных экспериментов



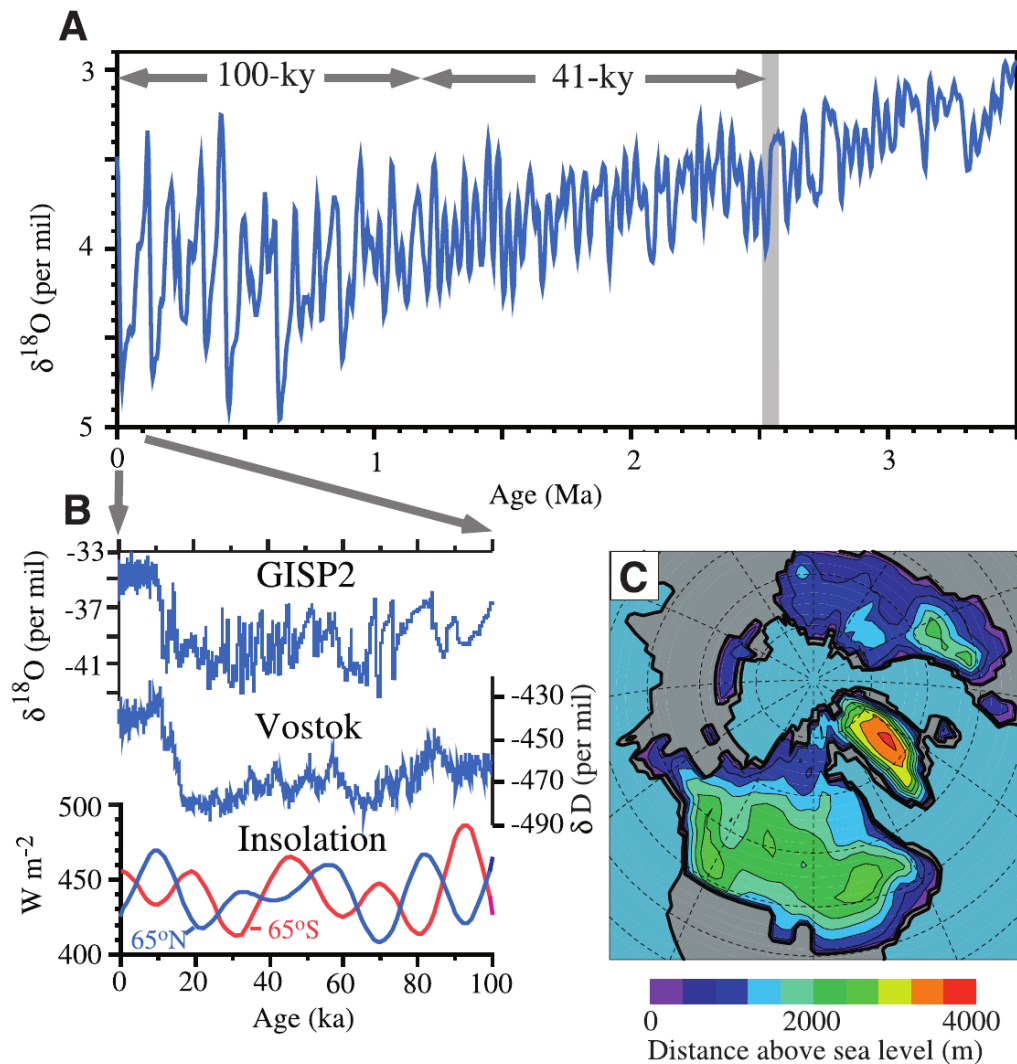
# Климат плейстоцена и голоцена (последние 2,5 млн лет)

ледовое бурение на станции Восток  
(Антарктида) [Petit et al., 1999]

[Clark et al., 1999]



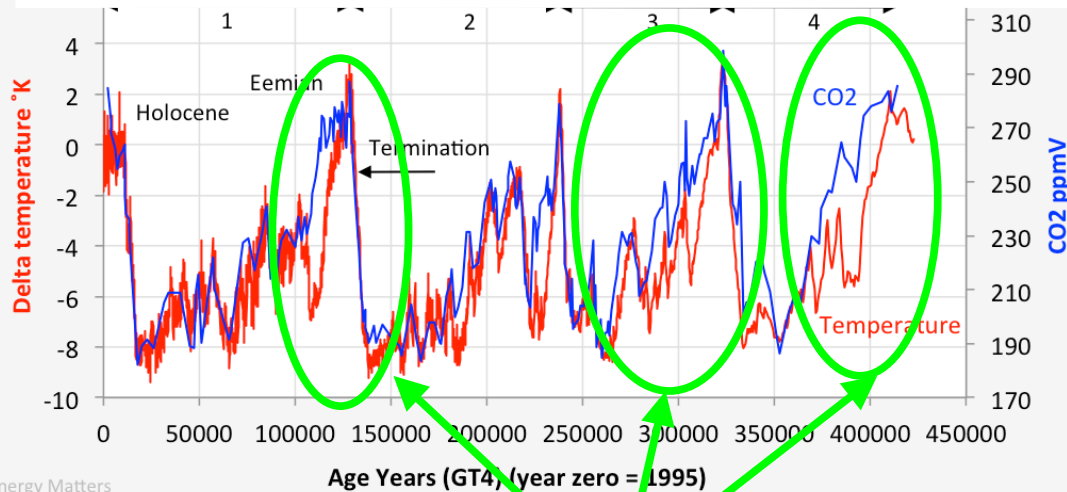
характеристика температуры



ТОЛЩИНА ШИТОВ  
21 ТЫС. Л.Н.

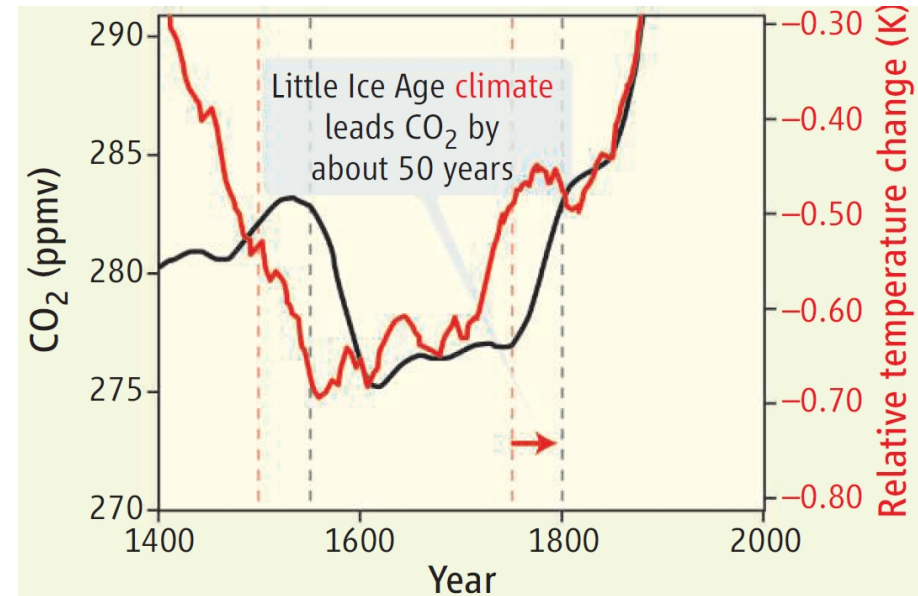
# Причинно-следственные связи в Земной системе: взаимное запаздывание между содержанием $\text{CO}_2$ в атмосфере и температурой (1)

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



**T опережает  $q_{\text{CO}_2}$  на несколько столетий**

Малый ледниковый период  
[Jones, Cox, 2008]



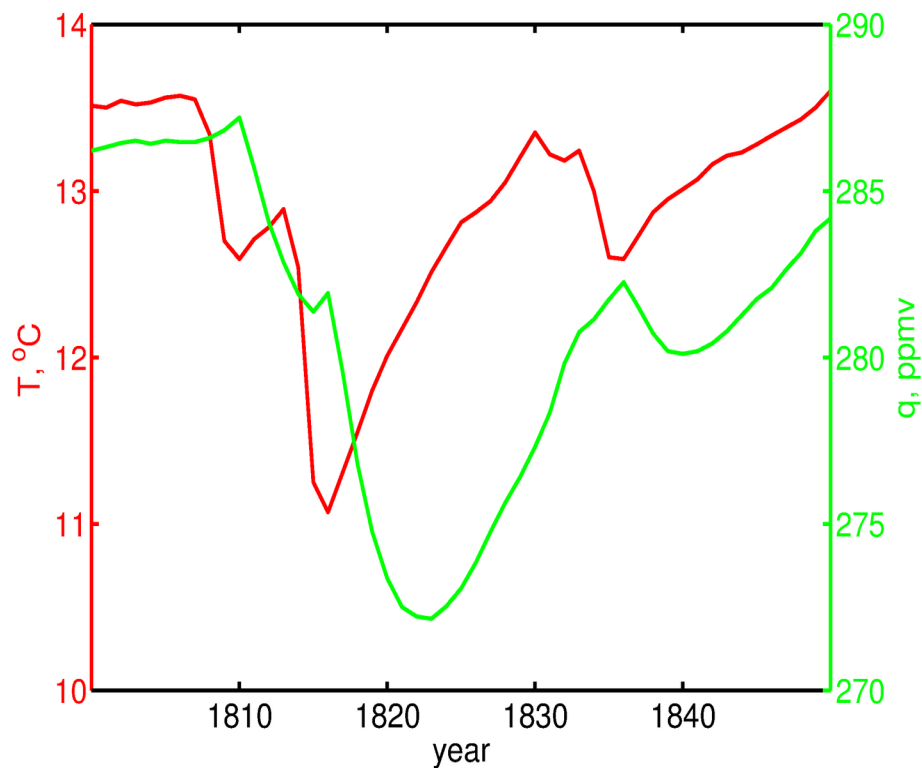
**T опережает  $q_{\text{CO}_2}$  на ~50 лет**

На основании этих данных утверждается, что

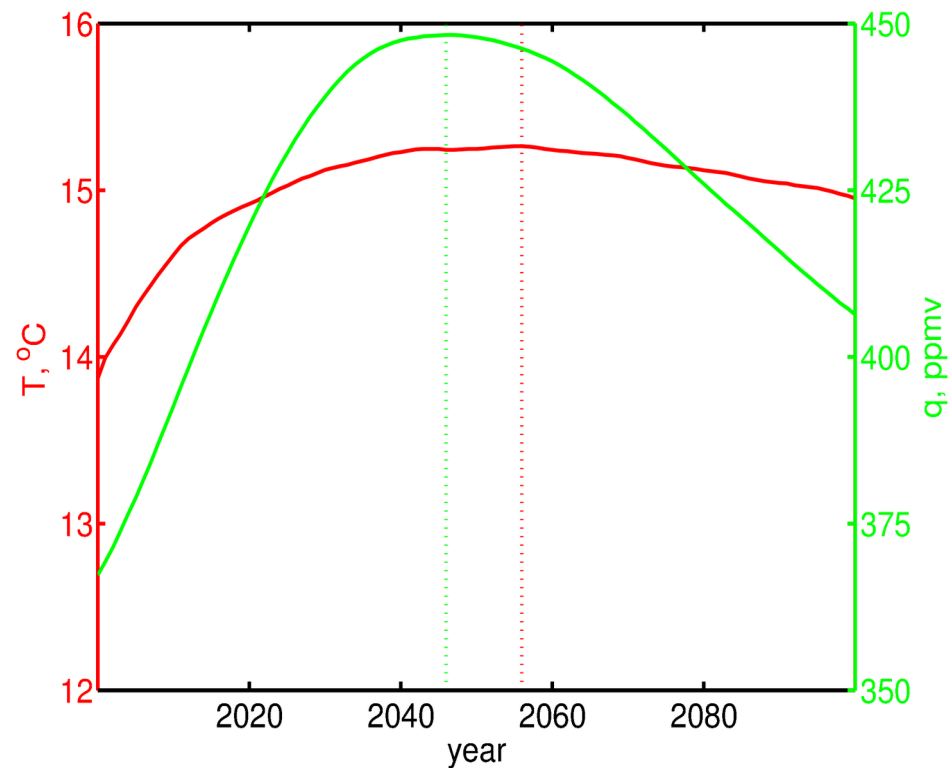
- 1) современные изменения климата не связаны с антропогенным парниковым воздействием на систему;
- 2) современные климатические модели, связывающие эти изменения с таким воздействием, неправильны.

# Причинно-следственные связи в Земной системе: взаимное запаздывание между $q_{CO_2}$ и температурой (2)

Численные эксперименты с МЗС ИФА РАН-МГУ: [Muryshev et al., 2017]



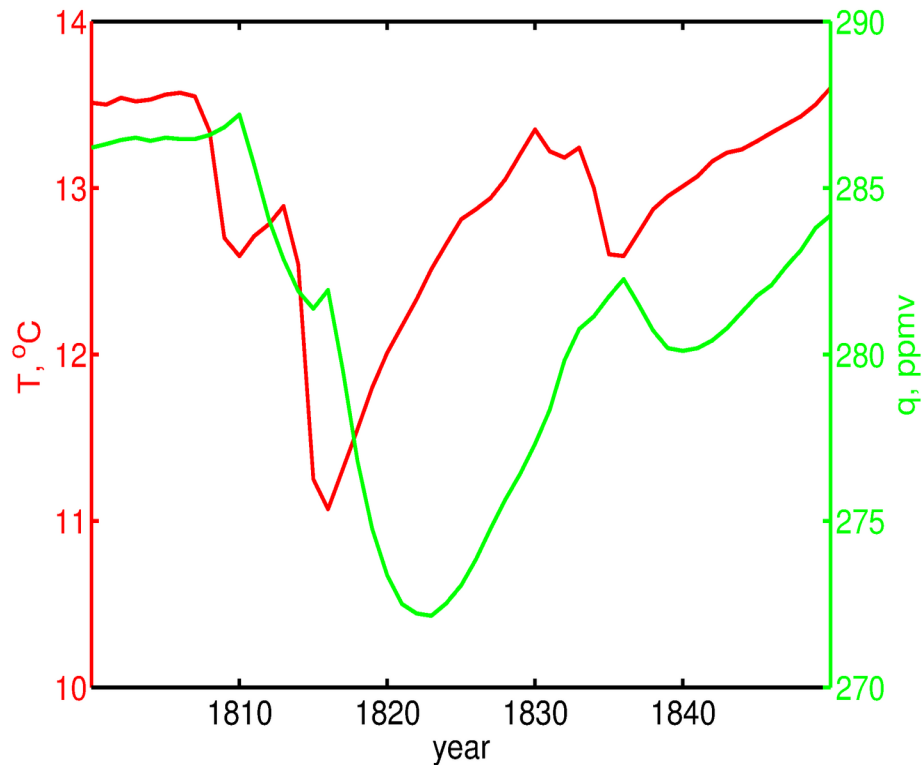
T опережает  $q_{CO_2}$



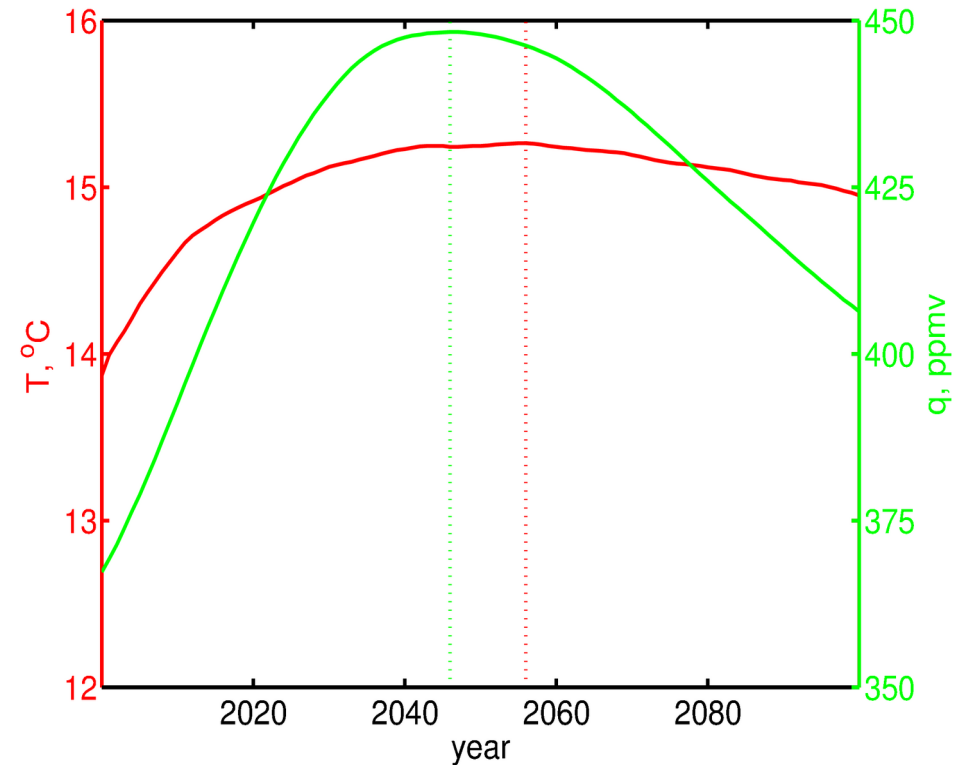
$q_{CO_2}$  опережает T

# Причинно-следственные связи в Земной системе: взаимное запаздывание между $q_{CO_2}$ и температурой (2)

Численные эксперименты с МЗС ИФА РАН-МГУ: [Muryshev et al., 2017]



$T$  опережает  $q_{CO_2}$



$q_{CO_2}$  опережает  $T$

**Знак взаимного запаздывания между переменными не может служить основанием для выводов о причинно-следственных связях в системе**

# Будущее оледенение (расчёт с моделью Climber-2) [Archer, Ganopolski, 2005]

заданы:  
изменение  
параметров  
орбиты Земли +  
внешние  
(антропогенные)  
CO<sub>2</sub> эмиссии  
в атмосферу

Наступление  
следующего  
оледенения  
определяется как  
параметрами  
Земной орбиты,  
так и  
современным  
состоянием  
климата

