



Научная сессия общего собрания СО РАН  
«Углеродная нейтральность –

современные вызовы»

Малый зал Дома ученых СО РАН

3 декабря 2021 г.

г. Новосибирск

# **Изменение климата, возможные механизмы и энергетика**

**С.В. Алексеенко,**

*академик РАН,*

*председатель Объединенного ученого совета СО РАН по энергетике, машиностроению, механике и процессам управления, научный руководитель Института теплофизики СО РАН*



# Фундаментальная роль энергетики

**ЭНЕРГЕТИКА** – базис экономики любой страны вне зависимости от технологического уклада. Однако сегодня в обществе возникла **беспрецедентная ситуация**, когда необходимо безотлагательно принимать принципиальные решения по дальнейшему **развитию мировой энергетики**.

## 21-я Всемирная конференция по климату (Париж, 2015)

- Принимали участие лидеры **195** стран мира.
- **186** стран до конференции представили добровольные обязательства по сокращению эмиссии **парниковых** газов.
- Подписано Соглашение, конечной целью которого является не допустить повышения температуры на **2°C** до **конца XXI столетия**.
- **Россия** ратифицировала соглашение **23.09.2019 г.** с обязательствами к 2030 г. не более **70%** выбросов парниковых газов от уровня 1990 г.
- Рост температуры связывается с **глобальным потеплением**, основной причиной которого считаются выбросы парниковых газов – прежде всего, **CO<sub>2</sub>**.
- Полагается, что **антропогенная эмиссия CO<sub>2</sub>** играет ключевую роль, а главным виновником антропогенных выбросов объявлена **энергетика** на **органическом топливе**.
- При выполнении требований Парижского соглашения структура мировой энергетики в ближайшие десятилетия должна претерпеть **радикальные изменения** в результате вытеснения **угля** и замещения его газом и безуглеродными источниками.



# Сомнения в положениях Парижского соглашения и альтернативные взгляды

- (1) «**Не существует** убедительных научных свидетельств того, что **антропогенный** выброс  $\text{CO}_2$  или других парниковых газов могут в обозримом будущем вызвать катастрофическое разрушение климата Земли». Из петиции правительству США, которую в 1997 году подписали более **15 тысяч** американских ученых.
- (2) В 2004 году аналогичное заключение официально объявила **РАН**.
- (3) Существуют прямые свидетельства того, что изменения содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере являются **следствием** изменения температуры, а не его причиной.
- (4) Колебания температур на Земле совершенно определенно связаны с колебаниями **солнечной активности!**
- (5) В будущем (через 50 – 70 лет) ожидается **глобальное похолодание** на Земле (**400-летний** период между великими минимумами – последний был в 1635 – 1715 гг.).
- (6) Колебания температур на Земле связаны с **прецессией** оси Земли и изменениями параметров **орбиты**.
- (7) **Антропогенный** вклад в эмиссию  $\text{CO}_2$  пренебрежимо мал (**4%**), все определяется природными выбросами.
- (8) Вклад  $\text{CO}_2$  в рост **температуры** Земли за счет парникового эффекта мал (**20%**), и не играет большой роли.
- (9) Основной вклад в парниковый эффект дают пары **воды (70%)**, а они не учитываются в моделях МГЭИК.
- (10) **Океан** может поглотить все избытки  $\text{CO}_2$ , поскольку в нем в **80** раз больше  $\text{CO}_2$ , чем в атмосфере.
- (11) **Климатические модели** Земли в силу невероятной сложности не могут адекватно учесть все факторы.
- (12) Рост температуры Земли **немонотонный**, а концентрации  $\text{CO}_2$  – **монотонный**, т.е. **нет корреляции**.
- (13) В **РФ** уже есть **баланс** между антропогенными выбросами  $\text{CO}_2$  и их поглощением лесами.
- (14) Нельзя измерить **температуру** Земли с такой **точностью**, чтобы утверждать о глобальном потеплении.
- (15) В геологическом плане **период наблюдения** (десятки лет) слишком мал для глобальных выводов.
- (16) Глобальное потепление – **политический заказ**, как и **озоновые дыры** в недалеком прошлом.

# Критерии достоверности моделирования

При моделировании **сложных** систем по объективным причинам (недостаточная точность измерений; слишком малый период наблюдений; стохастичность процессов) на практике невозможно достоверно подтвердить результаты моделирования. Тогда приемлемым допускается метод **бенчмаркинга**, который представляет собой сопоставительный анализ на основе эталонных показателей.

В научных исследованиях можно выделить **2** этапа. **1 этап** – сравнение моделей на основе решения тестовых (эталонных) задач и последующее определение наилучших моделей. **2 этап** – решение поставленных сложных задач с использованием разных моделей и отбор наиболее достоверных результатов с учетом иерархии моделей по качеству.

В **МГЭИК** приняты **5** уровней **достоверности** и **вероятностные** показатели.

## Модели МГЭИК:

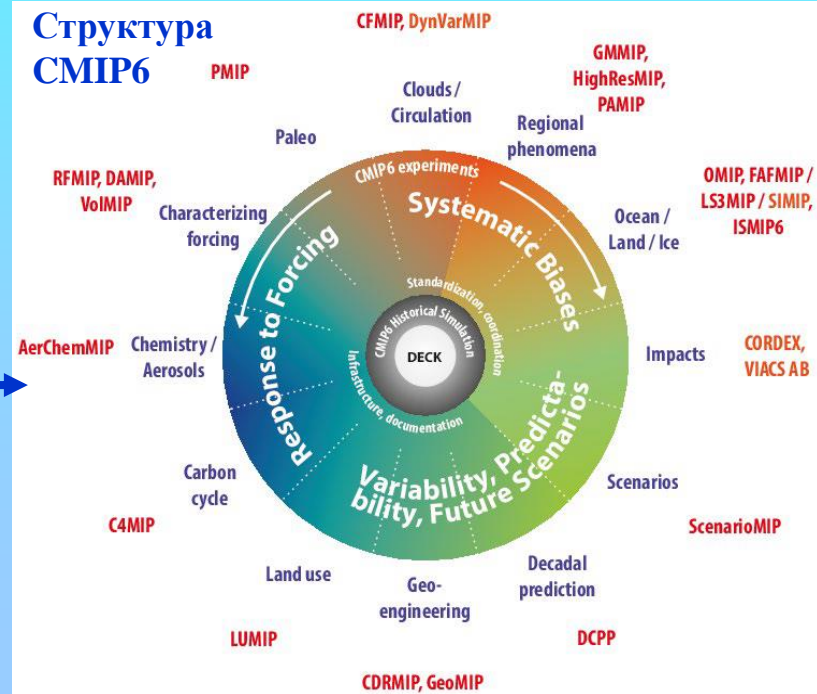
**МГЭИК** (IPCC) - Межправительственная группа экспертов по изменению климата. Является ведущим международным органом по оценке изменения климата. Учреждена Программой ООН и Всемирной метеорологической организацией в 1988 г.

**CMIP6** (6th phase of the Coupled Model Intercomparison Project – 6-ая фаза Проекта по взаимному сопоставлению сопряженных моделей).

В **России 4** модели:

1. **МЭИ** - (генетическая модель, *чл.-к. В.В. Клименко*).
2. Главная геофизич. обсерватория им. А. И. Воейкова.
3. **ИВМ** им. Г.И. Марчука РАН.
4. **ИФА** им. А.М. Обухова РАН (*ак. И.И. Мохов*).

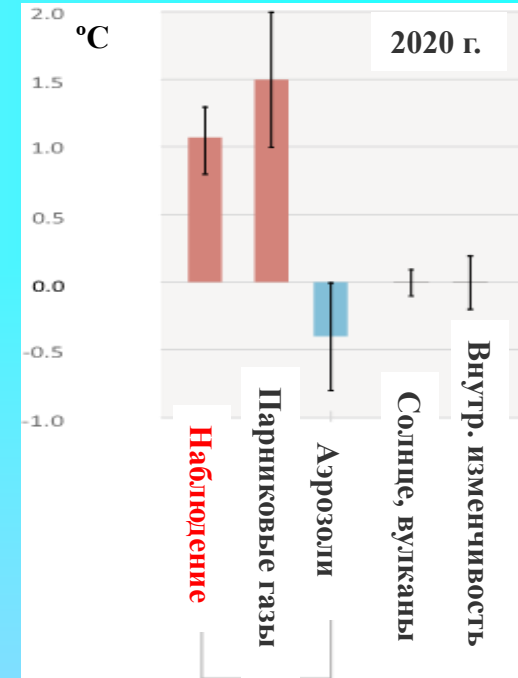
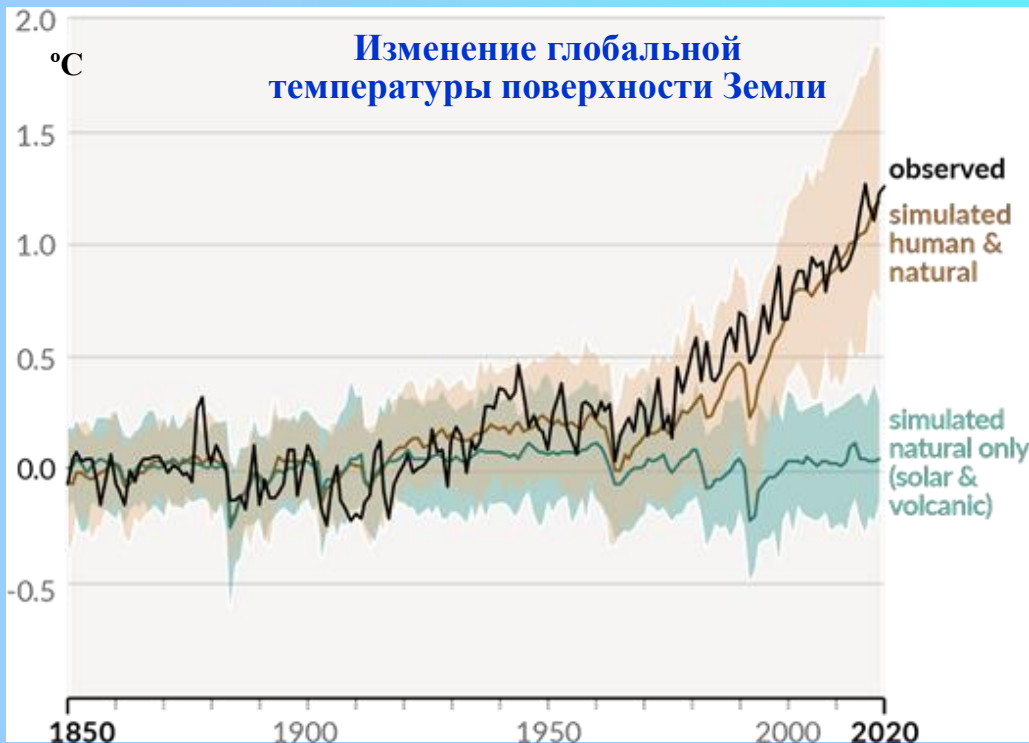
## Структура CMIP6





# МГЭИК (IPCC)

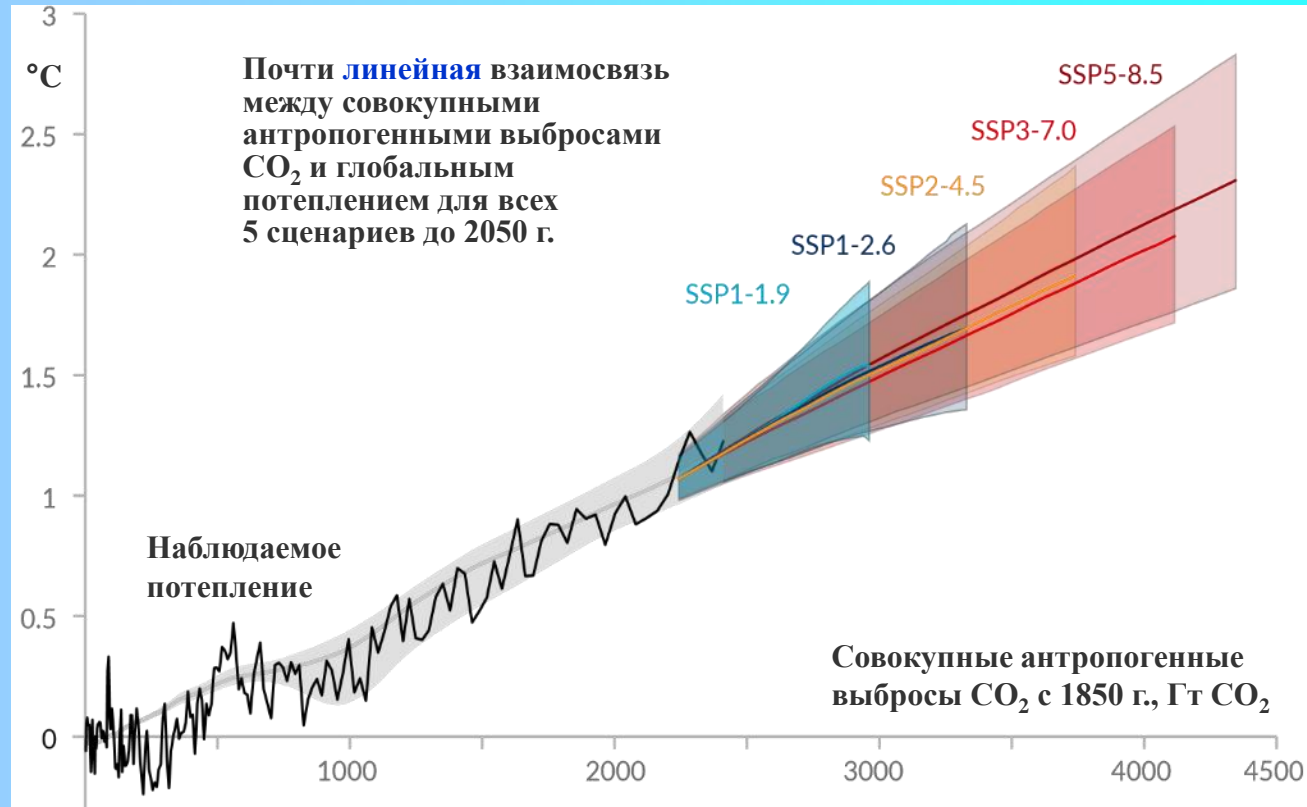
В организационную структуру **МГЭИК** в настоящее время входят три рабочие группы и одна целевая группа. **Рабочая группа I** занимается **физическими** основами науки об изменении климата, **Рабочая группа II** — последствиями изменения климата, адаптацией и уязвимостью, а **Рабочая группа III** — смягчением воздействий изменения климата. В **августе 2021 г.** вышел Доклад Рабочей группы I, как часть 6 оценочного доклада, объемом **4 тыс. стр.**



**Изменения температуры, связанные с парниковыми газами, аэрозолями, озоном и изменениями в землепользовании (коэффициент отражения в землепользовании), солнечными и вулканическими факторами и внутренней изменчивостью климата.**



# Повышение глобальной температуры к 2050 г. в зависимости от совокупных выбросов CO<sub>2</sub>

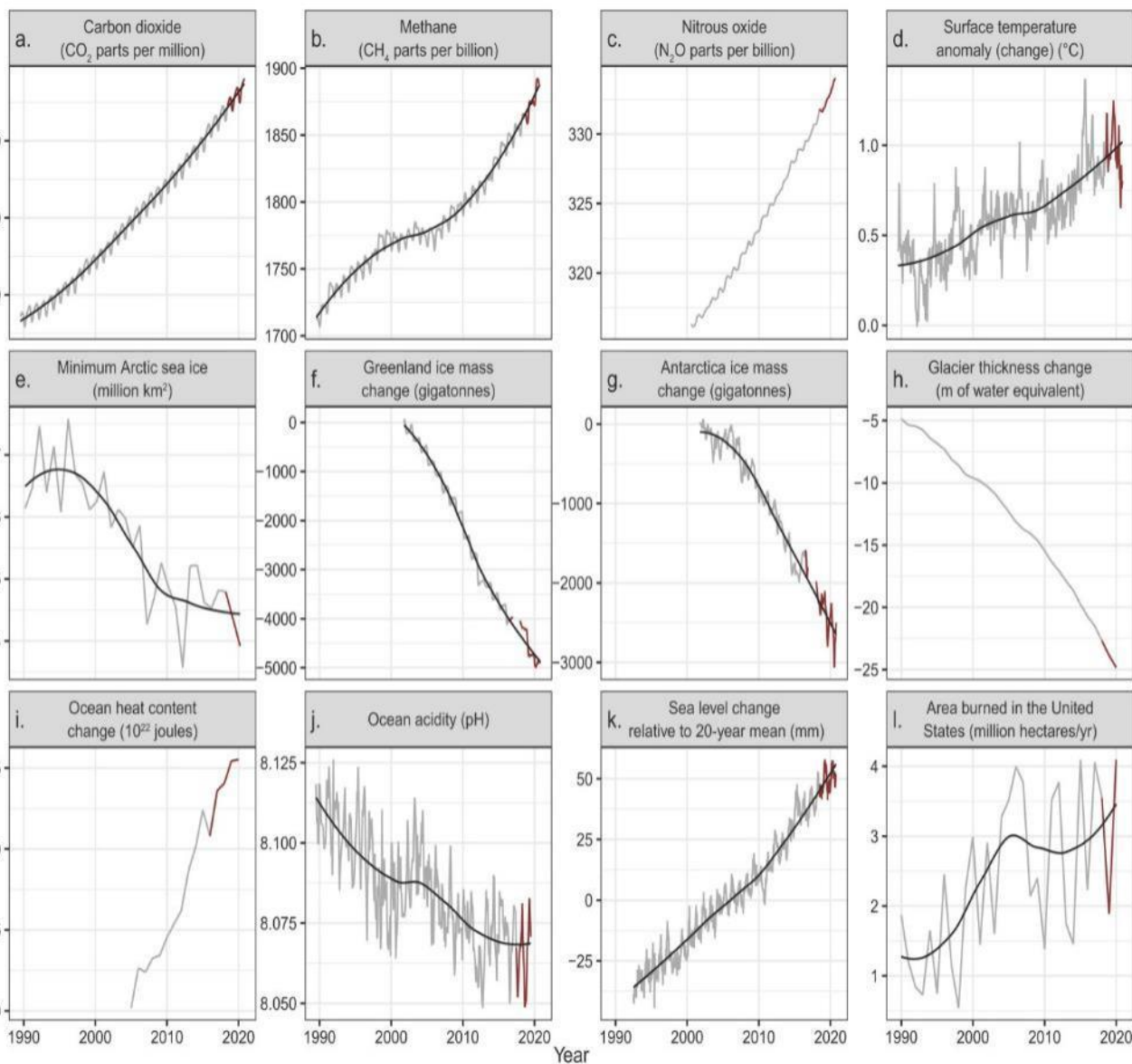


Существует почти **линейная** взаимосвязь между совокупными антропогенными выбросами CO<sub>2</sub> и глобальным потеплением, которое они вызывают. По оценкам, каждые **1 000 Гт CO<sub>2</sub>** совокупных выбросов CO<sub>2</sub> могут привести к повышению глобальной температуры поверхности на **0,45°C**. Это количество называется **переходной климатической реакцией на совокупные выбросы CO<sub>2</sub>** (TCRE). Такая взаимосвязь подразумевает, что достижение чистого нуля антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> является **необходимым условием** для стабилизации вызванного человеком повышения глобальной температуры.



# “World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021”.

## Предупреждение ученых мира о климате. Чрезвычайная ситуация 2021.



«Мы подтверждаем декларацию о чрезвычайной ситуации в области климата и призываем к преобразовательным мерам, которые сейчас необходимы больше, чем когда-либо, для защиты жизни на Земле».

**The World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2021** (*Ripple et al. 2020*). Эта статья имеет более **13 900** подписей (**158** стран). Чтобы подписаться, посетите Alliance of World Scientists website: <https://scientistswarning.forestry.oregonstate.edu>.

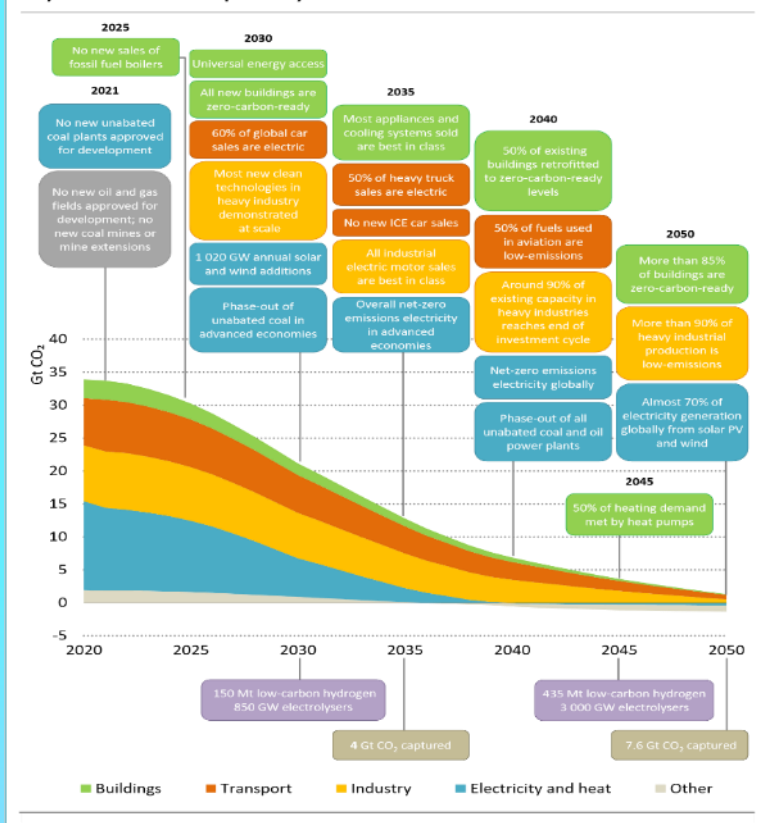
*Ripple et al. // BioScience, 2021.*  
<https://academic.oup.com/bioscience>

**97%** климатологов признают данную ситуацию с климатом. **Национальная Академия США и Американское физическое общество – среди сторонников.**

# «Net Zero by 2050» A Roadmap for the Global Energy Sector

Дорожная карта для глобальной энергетической системы - одно из самых важных и сложных начинаний в истории МЭА (IEA -International Energy Agency). Лидеры G7 признают дорожную карту МЭА "Чистый ноль к 2050 году" (июнь 2021).

Key milestones in the pathway to net zero



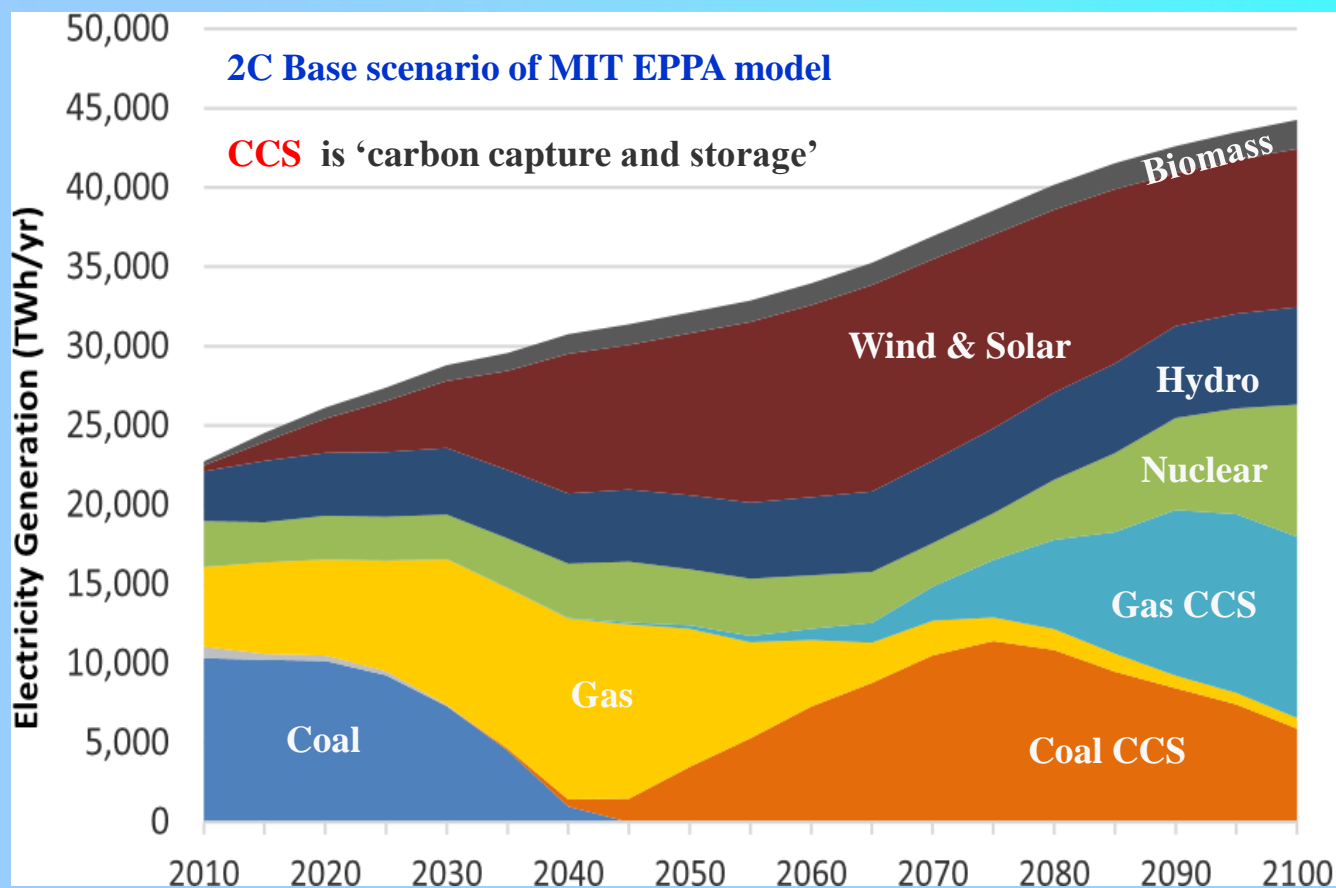
**Энергетический** сектор дает **3/4** выбросов **парниковых** газов (но доля «большой» энергетики - **40%**).  
К **2021** году не будет вложений в разработку новых **угольных** станций и месторождений **нефти** и **газа**.  
К **2024** году не будет новых продаж **котлов** на **органическом** топливе.  
К **2030** году страны **G7** приняли решение отказаться от **угля** в качестве топлива.  
К **2030** году доля **электромобилей** в мировых продажах автомобилей вырастет с **5%** до более чем **60%**.  
К **2035** году продаж новых легковых автомобилей внутреннего сгорания не будет.  
К **2040** году мировая электроэнергетика уже достигнет **нулевого** объема выбросов.  
К **2050** году почти **90%** производства электроэнергии будет производиться из **возобновляемых** источников, при этом на долю **ветра** и **солнечной** энергии вместе приходится почти **70%**.  
Оставшаяся часть будет приходиться в основном на **ядерную** энергетику.





# Сценарий MIT

*Morris et al. // Climate Change Economics, 2021*



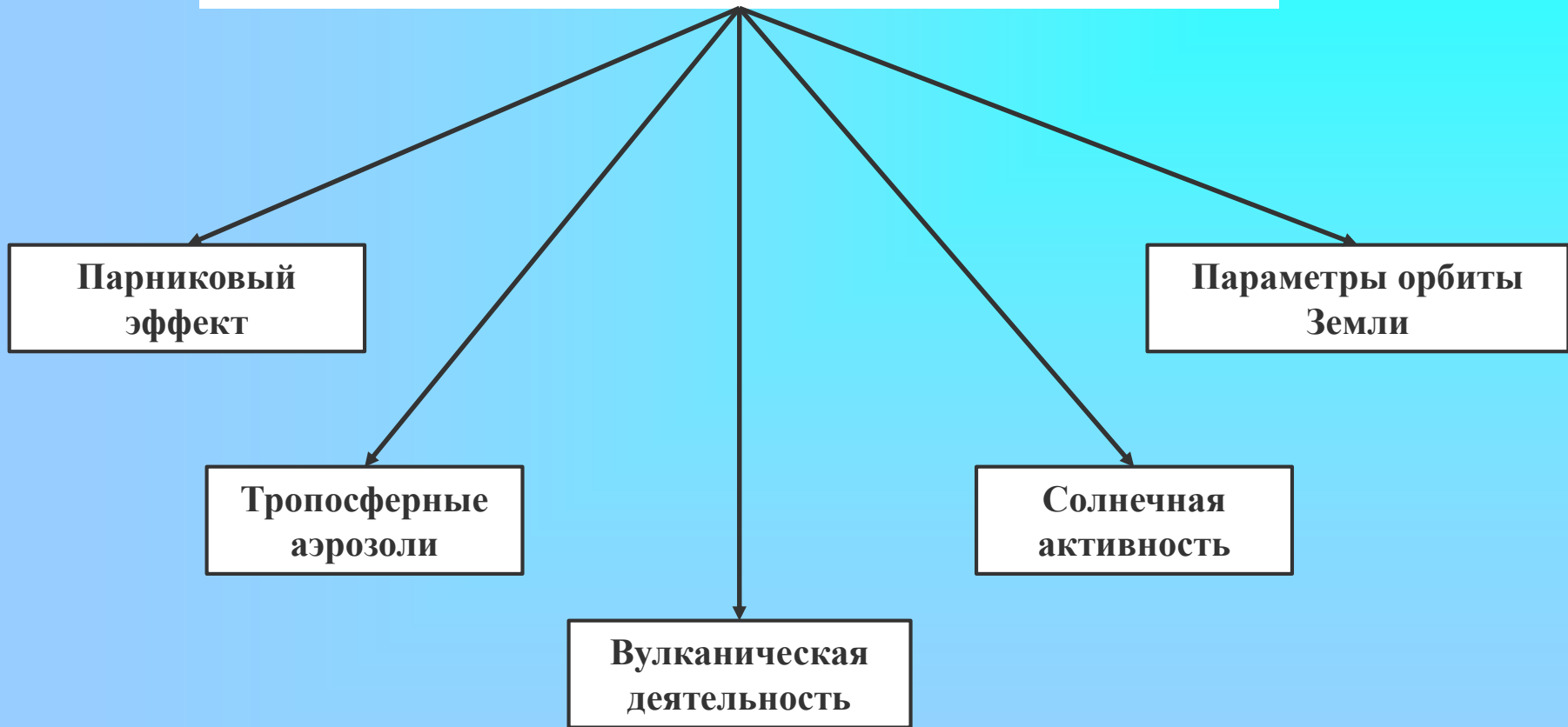
**2C Base scenario** приводит к совершенно иному сочетанию электроэнергии, чем в **Reference scenario**, а также к меньшему общему производству (примерно на **30%** меньше в 2100 году). К 2100 году на **CCS** приходится почти **40%** мирового производства электроэнергии. Конечная глобальная генерация в 2100 году составит около **13% coal CCS, 26% gas CCS, 19% nuclear, 14% hydro, 23% wind and solar, 4% biomass** и менее **2% natural gas**.

**EPPA** - это вычислимая общая равновесная многорегиональная, многосекторная рекурсивно-динамическая модель **мировой экономики**. Сценарий **2C** означает стабилизацию средней температуры атмосферы на **2°C** выше уровня доиндустриальных лет с вероятностью **66%**.

Типичное **увеличение** затрат на электроэнергию для **угольных** электростанций составляет **60%** при снижении выбросов **CO<sub>2</sub>** на **95%**. Для **газовой** электростанции типичное увеличение составляет **40%** при сокращении выбросов **CO<sub>2</sub>** на **90%**.



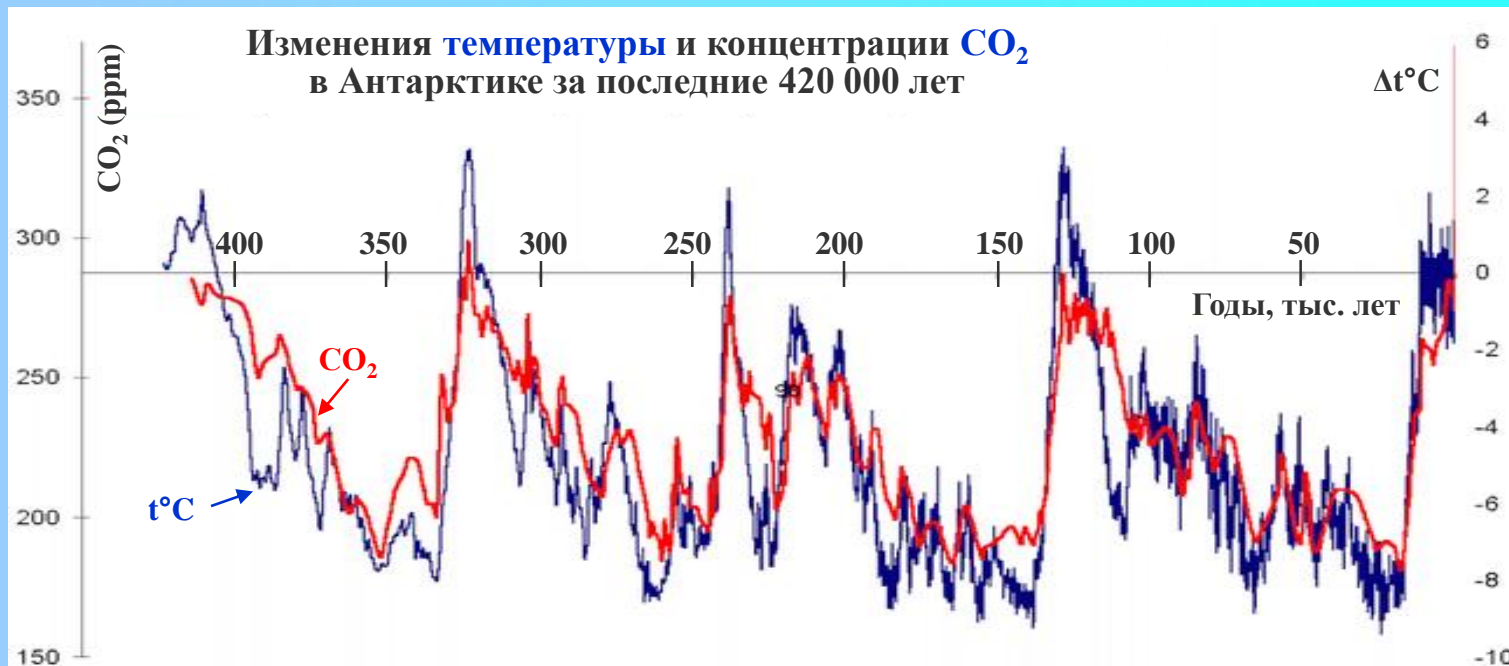
# Факторы, влияющие на климат





# Влияние параметров орбиты Земли

*Petit et al. // Nature, 1999*



Циклическое чередование ледниковых и межледниковых периодов объясняется изменениями в орбите движения Земли относительно Солнца (**циклы Миланковича**). Выделяют **3** основных цикла.

1. Долгопериодические колебания эксцентриситета орбиты Земли с периодом около **96 000 лет**.
2. Долгопериодические колебания угла наклона земной оси к плоскости её орбиты с периодом **41 000 лет**.
3. Поворот земной оси так, что ось описывает конус ( $46^\circ$ ) с периодом **23 000 лет** (прецессия).

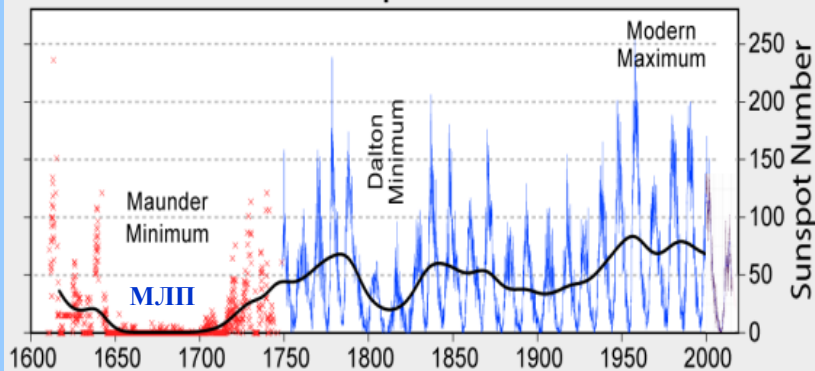
Суммарно эти циклы приводят к **периодичности** в потоке **солнечной радиации** на Землю.

Поскольку циклы некратные, то наблюдается не совсем регулярный отклик по температуре.

**Резюме:** Циклы Миланковича не влияют на наблюдаемое глобальное потепление.

# Влияние солнечной активности

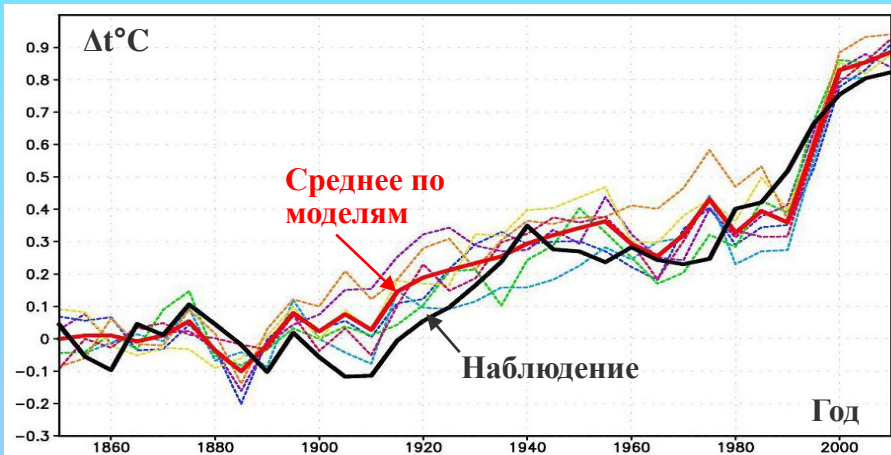
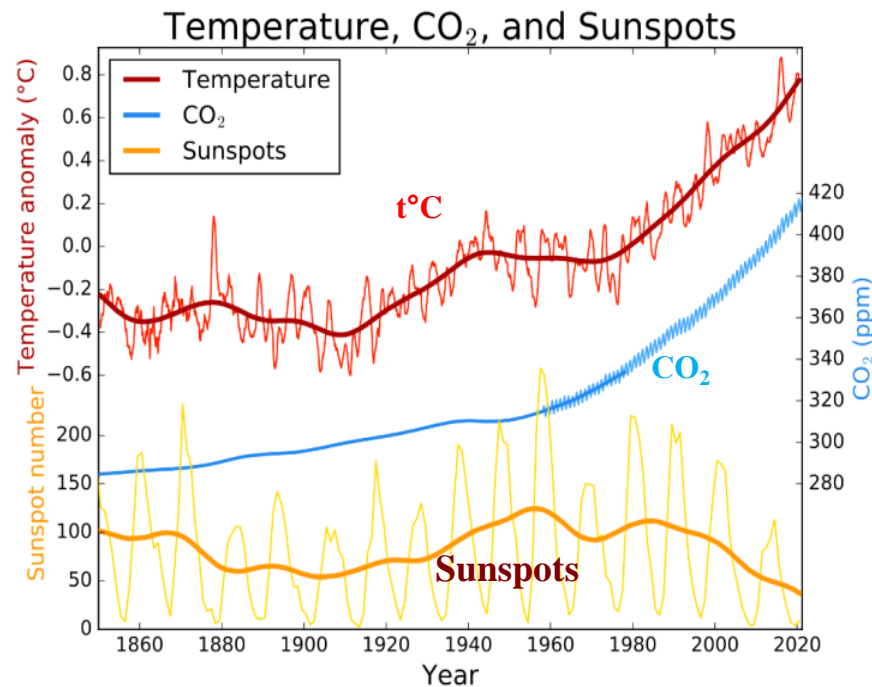
## 400 Years of Sunspot Observations



Основные циклы солнечной активности:

**11, 22 и 2300 лет.** Снижение солнечной активности (числа пятен или числа Вольфа) привело к наступлению **малого ледникового периода (МЛП)** в **17 – 18 веках**. А вот рост солнечной активности между **1900 и 1950 гг.** привел к некоторым **потеплениям**. С **2004 г.** наблюдается **Современный Минимум** солнечной активности.

Полное количество солнечной радиации, получаемой на верхней границе земной атмосферы, составляет в среднем **1 361 Вт/м<sup>2</sup>**. Светимость Солнца изменяется на **1,3 Вт/м<sup>2</sup>** или на **0,1 %** в пределах **11-летних** циклов.  
**Вывод: 11-летний цикл** не влияет на изменения климата.



Сравнение наблюдаемого изменения температуры (черный цвет) с **моделями** (цветные линии).

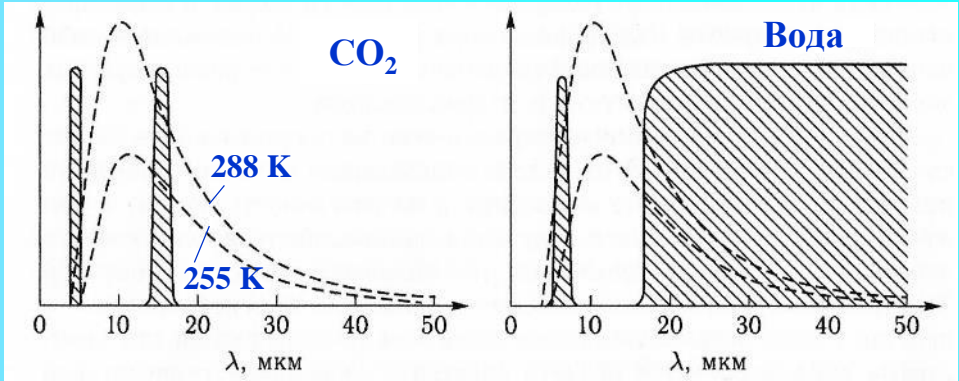


# Парниковый эффект

**Парниковый эффект** — повышение температуры нижних слоёв атмосферы за счет ее различной прозрачности в видимом и дальнем инфракрасном диапазонах (Аррениус, 1896).

**Чувствительность климата** – рост температуры нижних слоёв атмосферы при удвоении концентрации CO<sub>2</sub>.  
Оценка МГЭИК: 3°C.

Средняя температура Земли: 14°C.  
Без парникового эффекта: -19°C.  
Т.е., роль парникового эффекта: +33°C.



Спектры поглощения CO<sub>2</sub> и воды, а также теплового излучения Земли (288 К) и атмосферы (255 К)

Смирнов (2017)

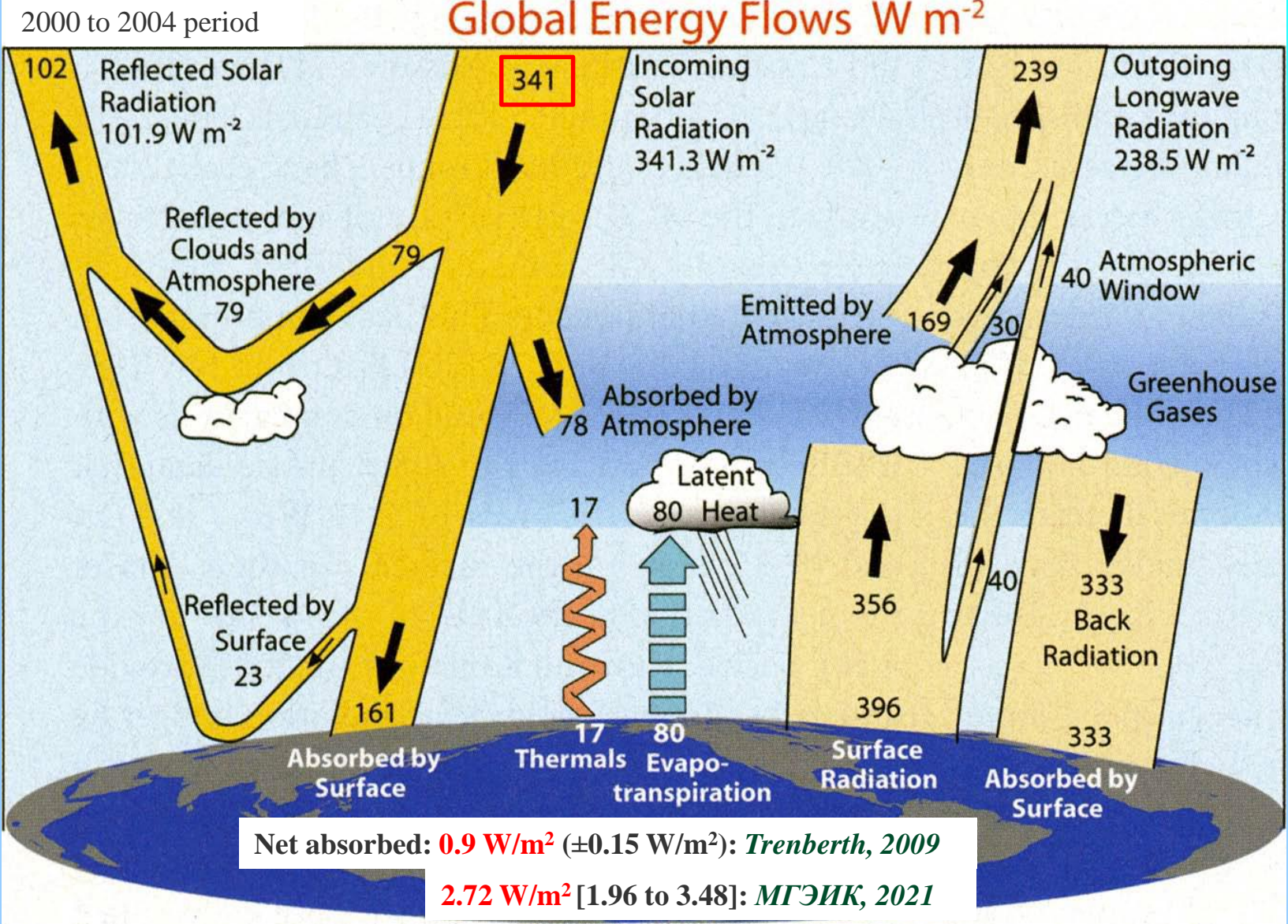
## Основные парниковые газы атмосферы Земли

Газ	Вклад
Водяной пар	36 — 72 %
Диоксид углерода	9 — 26 %
Метан	4 — 9 %
Озон	3 — 7 %





# Баланс энергии на Земле



Trenberth, Fasullo, Kiehl // Bull. American Meteorological Society, 2009

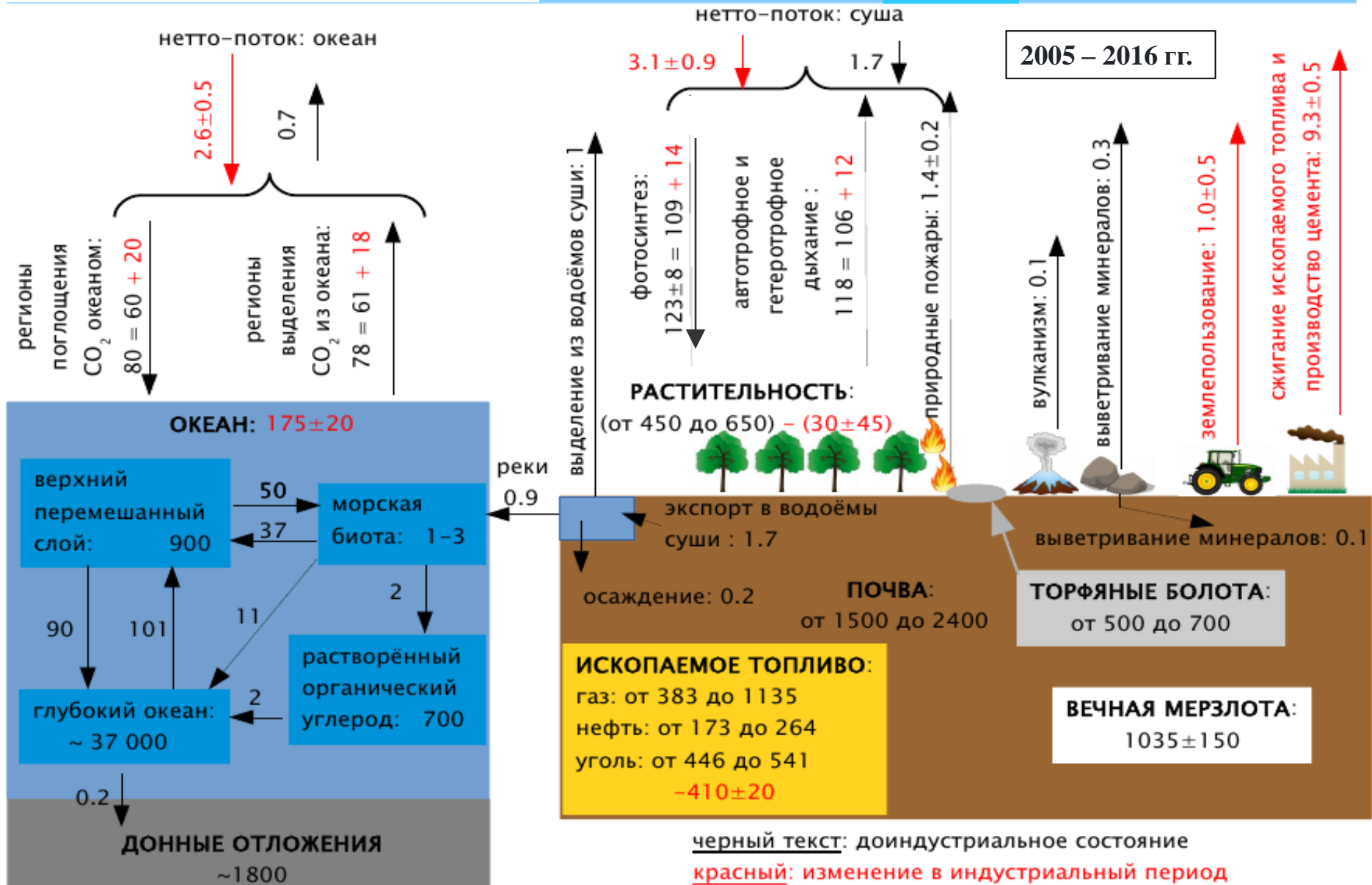
# Углеродный цикл

АТМОСФЕРА

средняя скорость роста **4 ГтС/год**

Накоплено, ГтС:

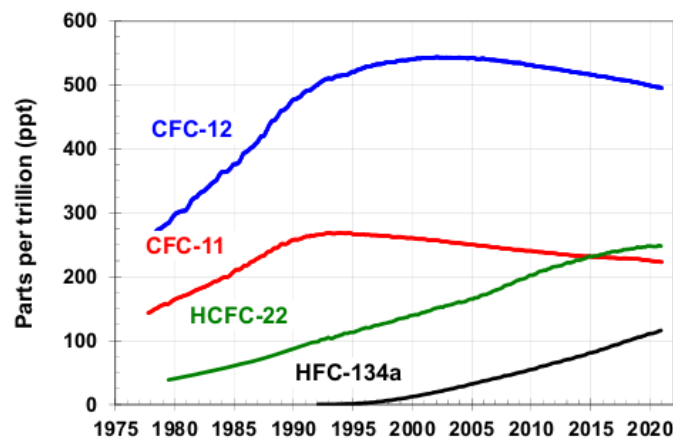
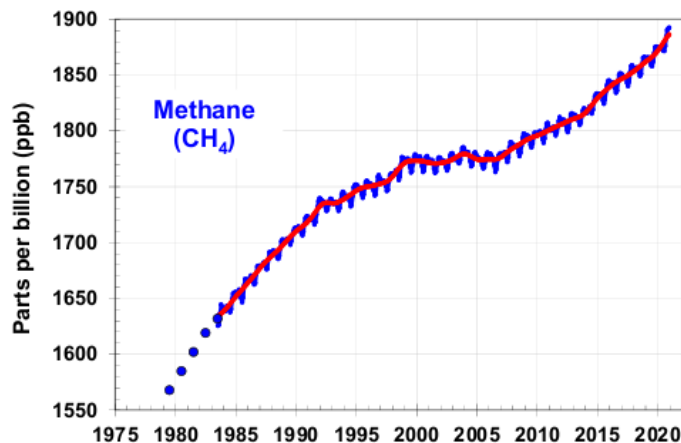
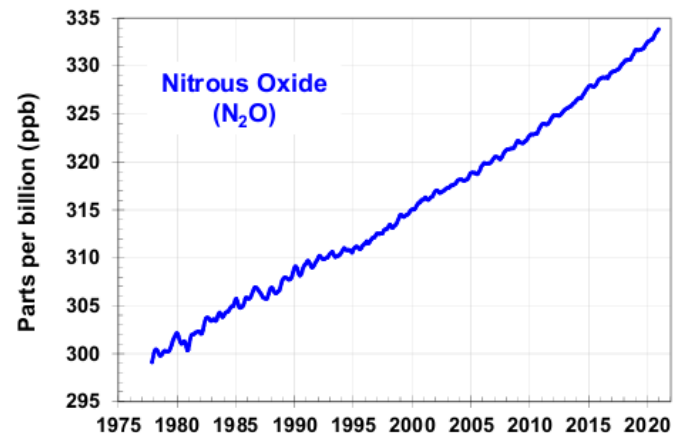
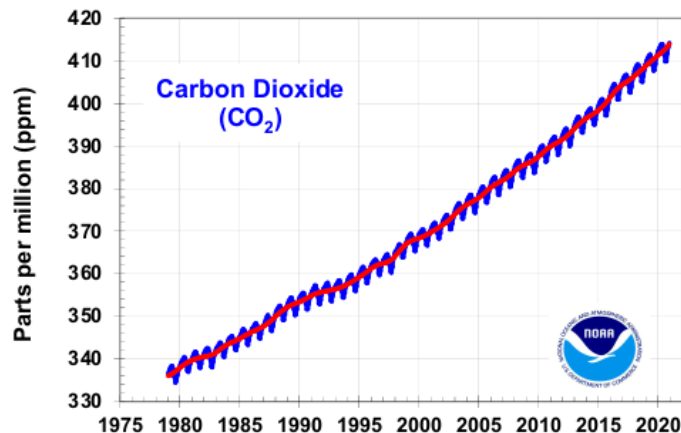
589 + (260)



Запасы: ГтС

Потоки: ГтС/год

# Парниковые газы в атмосфере Земли



Глобальное среднее содержание основных, хорошо смешанных, долгоживущих парниковых газов (NOAA, Global Monitoring Laboratory). NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) — Национальное управление океанических и атмосферных исследований (<https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>).

Вклад CO<sub>2</sub> в парниковый эффект примерно в 2 - 3 раза выше других парниковых газов (кроме воды).

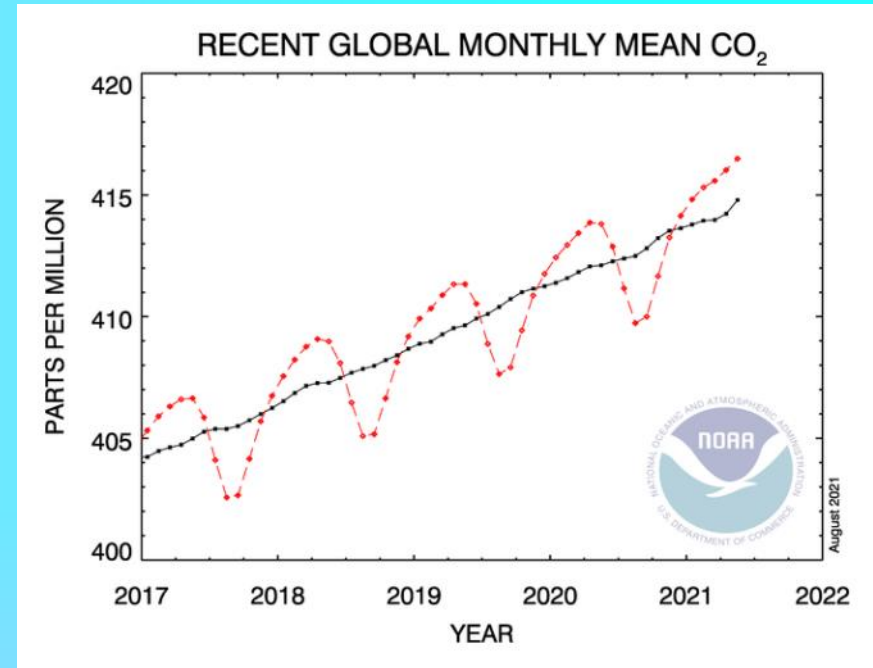
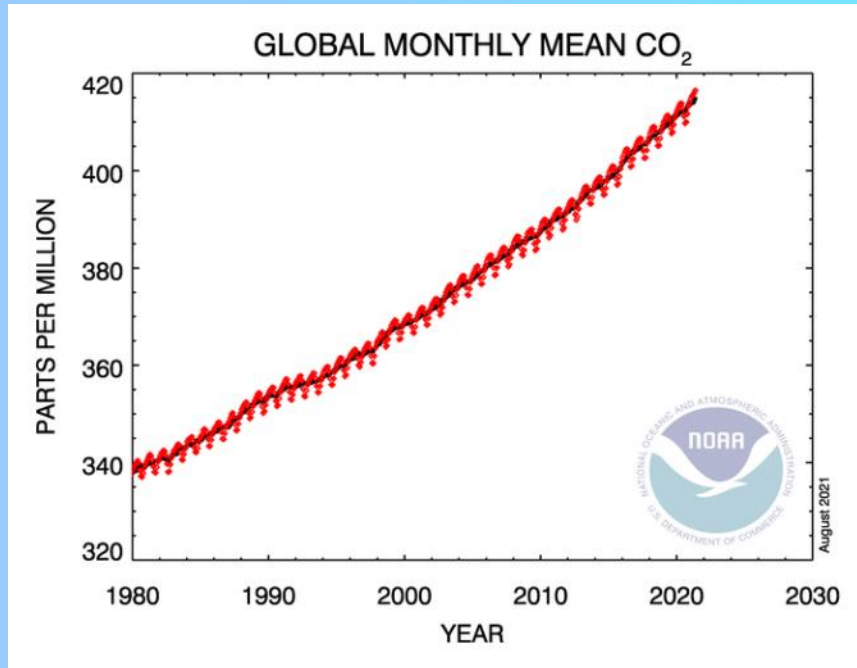
Водяной пар вносит основной вклад в парниковый эффект — до 72%.

Очень сильная зависимость влажности от температуры:  $\exp(-h/T^2)$ , что дает сильную обратную связь.





# Среднемесячные значения концентрации CO<sub>2</sub>



Графики показывают среднемесячное значение двуокиси углерода в глобальном масштабе, усредненное по участкам **морской** поверхности. **Красные** линии и символы представляют среднемесячные значения, центрированные в середине каждого месяца. **Черные** линии и символы - для среднего сезонного цикла.

Концентрация **CO<sub>2</sub>** в атмосфере с 1850 г. по настоящее время возросла на **48%** в результате сжигания органического топлива в процессе деятельности человека. Столь высокого уровня она не достигала ни разу в последние **420 тыс. лет**, а возможно, и в последние **20 млн. лет**.

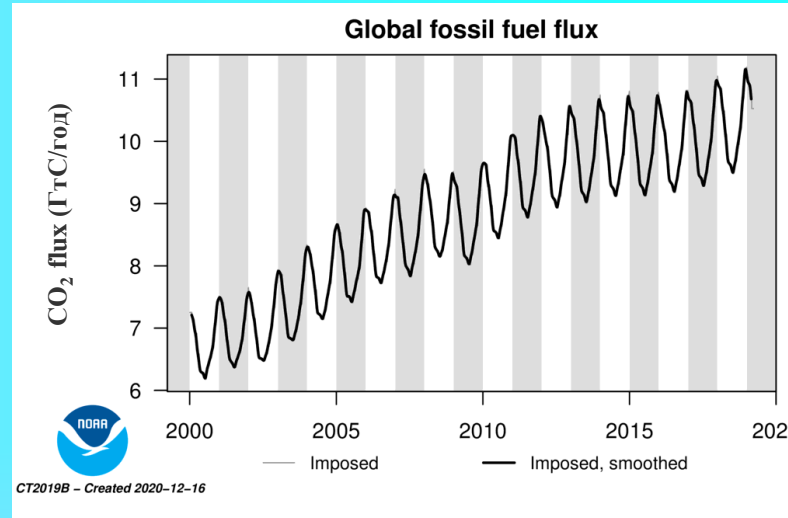
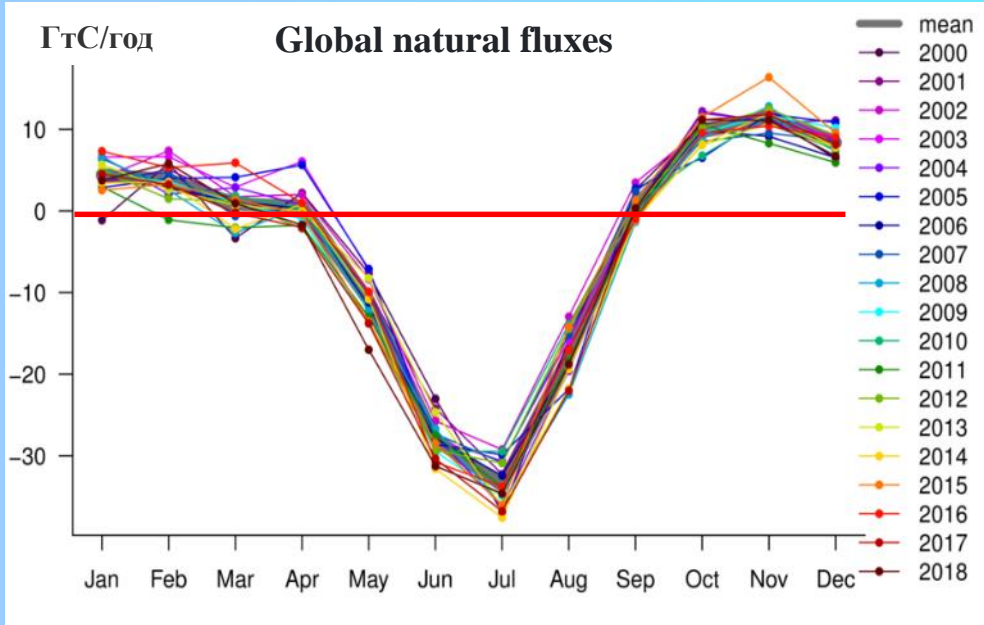
History of atmospheric carbon dioxide from 800,000 years ago until 2019 (анимация):  
<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/history.html>

**Global Monitoring Laboratory**

*Conway, 1994; <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>*



# Среднемесячные значения концентрации CO<sub>2</sub>



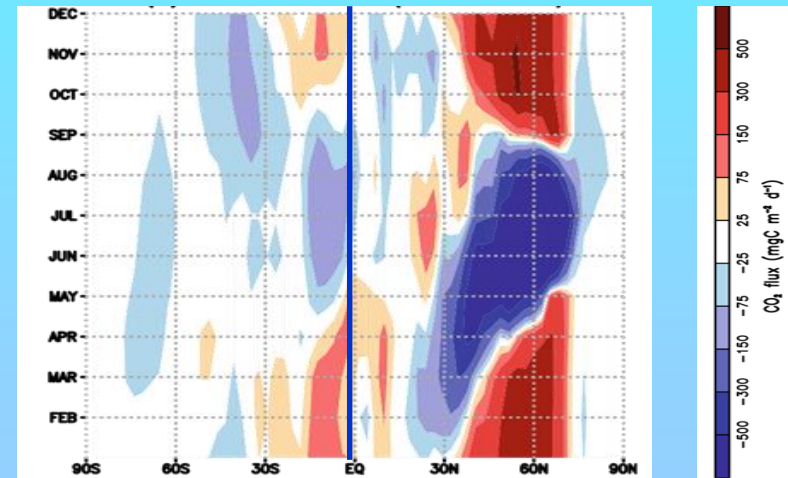
Годовой цикл оптимизированных **natural fluxes**, рассчитанных по месяцам и нанесенных для каждого года. «Natural flux» - это сумма выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу из наземной биосферы, пожаров и морской поверхности. Он не включает выбросы ископаемого топлива.

Годичные колебания потоков:

**natural fluxes = 40 ГтС/год**

**fossil fuel emissions = 1,5 ГтС/год (менее 4% от natural).**

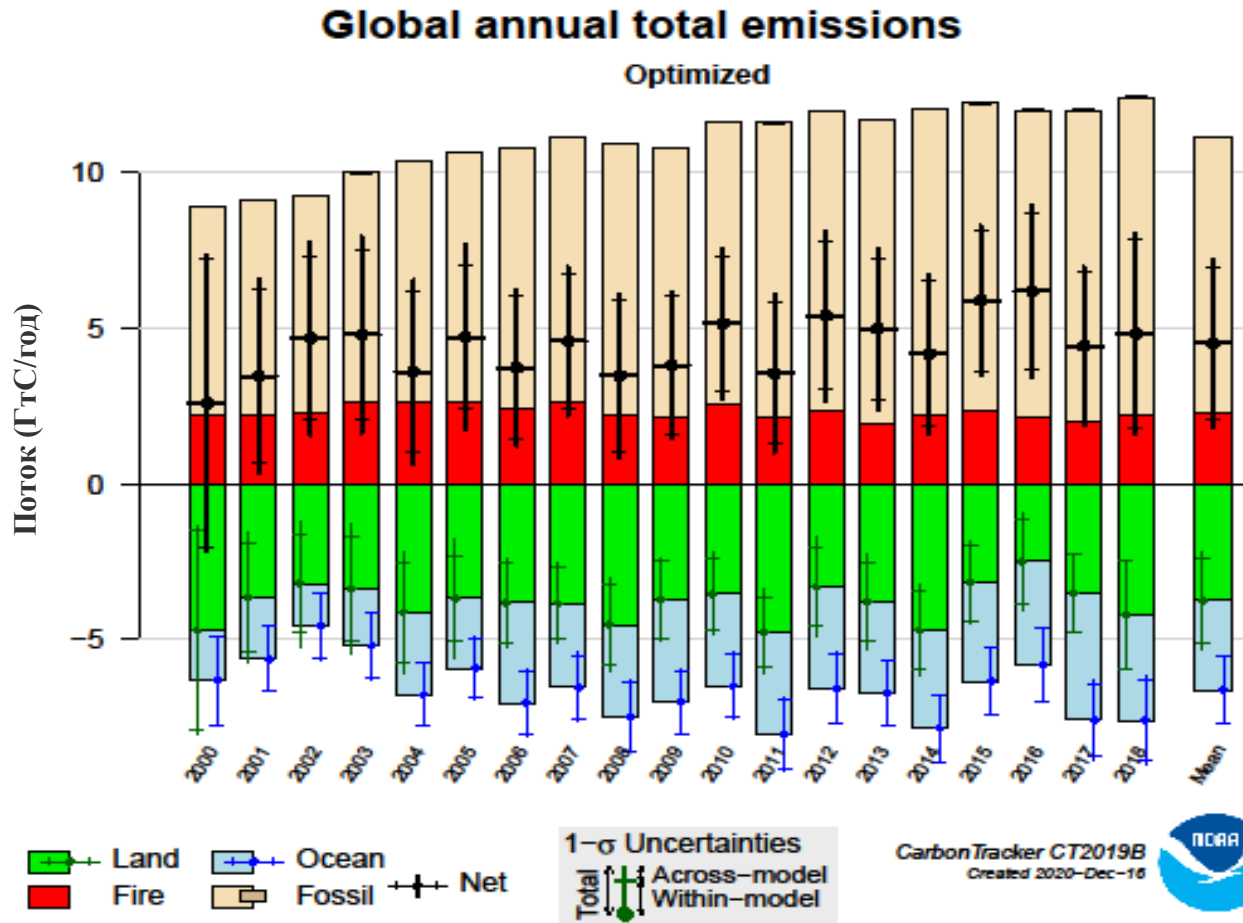
Колебания несут сезонный характер (фотосинтез).



**Локальные потоки CO<sub>2</sub>** в зависимости от широты и дня в году (mgC m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Модель MROC-ES2LF (2000 – 2009). *Patra et al. // Progress Earth and Planetary Science (2021).*



# Баланс потоков CO<sub>2</sub> на Земле



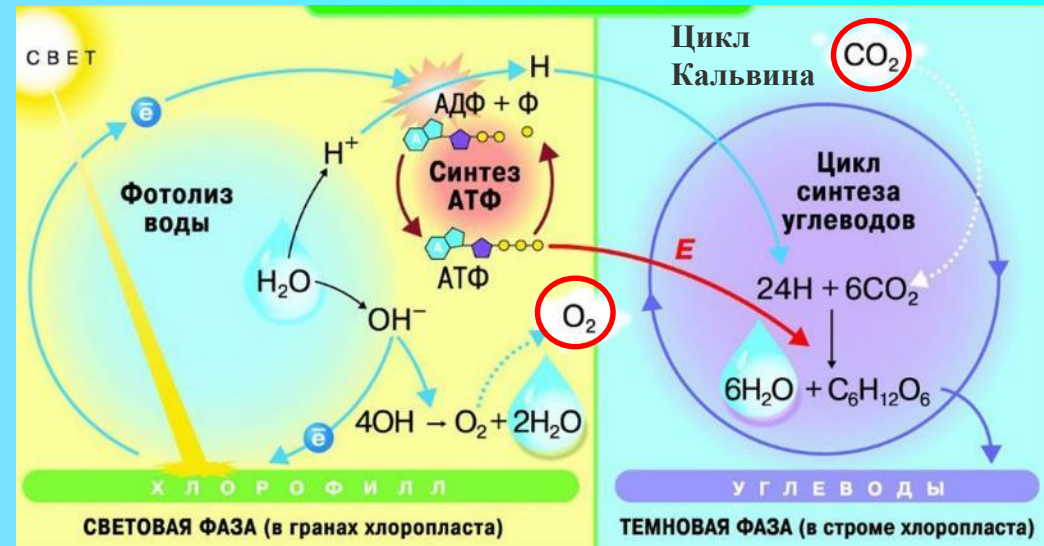
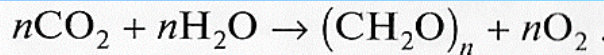
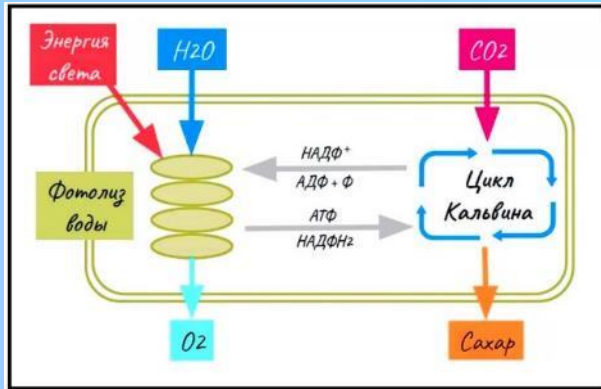
Дисбаланс  
+4 млрд. т С/год!

Столбики на этом рисунке представляют выбросы CO<sub>2</sub> за каждый год в млрд. т С / год по всему миру. Показаны разным цветом: выбросы ископаемого топлива (**коричневый**), поток земной биосферы, исключая пожары (**зеленый**), прямые выбросы от пожаров (**красный**) и газообмен воздух-море (**синий**). Отрицательные выбросы указывают на то, что поток удаляет CO<sub>2</sub> из атмосферы. Чистый поверхностный обмен, показан толстой черной линией. Видно, что дисбаланс в последние годы: **+4 млрд. т С / год!**



# Фотосинтез (суша)

## Упрощенная схема фотосинтеза



Кислород выходит из **воды**, но не из **CO<sub>2</sub>**. Фотосинтез протекает непосредственно в зеленых частях растений – **хлоропластах**. Они входят в состав растительных клеток. Хлоропласты содержат вещество – **хлорофилл**.

Фотосинтез делится на две стадии: **световую** и **темновую**. Протекают они одновременно, но в разных частях хлоропласта. Реакции темновой фазы делятся на три основных типа и зависят от вида растений: **C<sub>3</sub>-растения**; **C<sub>4</sub>-растения**; **CAM-растения**.





# Скорость фотосинтеза

## Факторы, влияющие на фотосинтез:

- Вода** является основополагающим фактором, поэтому при ее **недостатке** реакции замедляются.
- Наиболее благоприятны волны **красного и сине-фиолетового** спектра.
- Также предпочтительнее **высокая степень освещенности  $W$** , но до определенного значения.
- Высокая концентрация углекислого газа  $[CO_2]_a$**  обеспечивает быстрый фотосинтез и наоборот.
- Определенная **температура** важна для ферментов, которые ускоряют реакции.
- Идеальные условия— около **25 - 30°C**.
- На скорость фотосинтеза влияет **устычная проводимость  $V$** .
- Скорость реакции  $r$**  одинакова для всех зеленых растений.

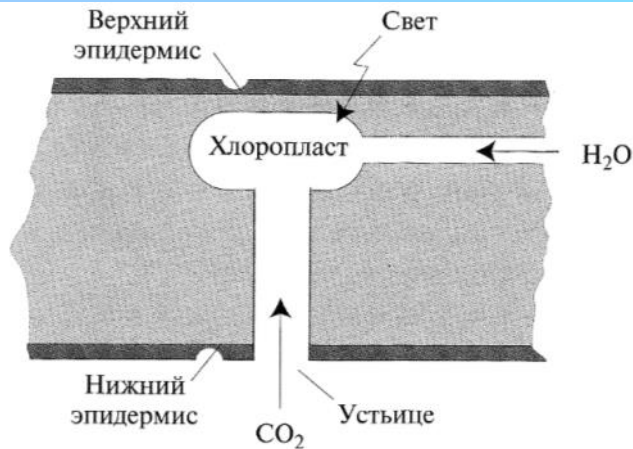
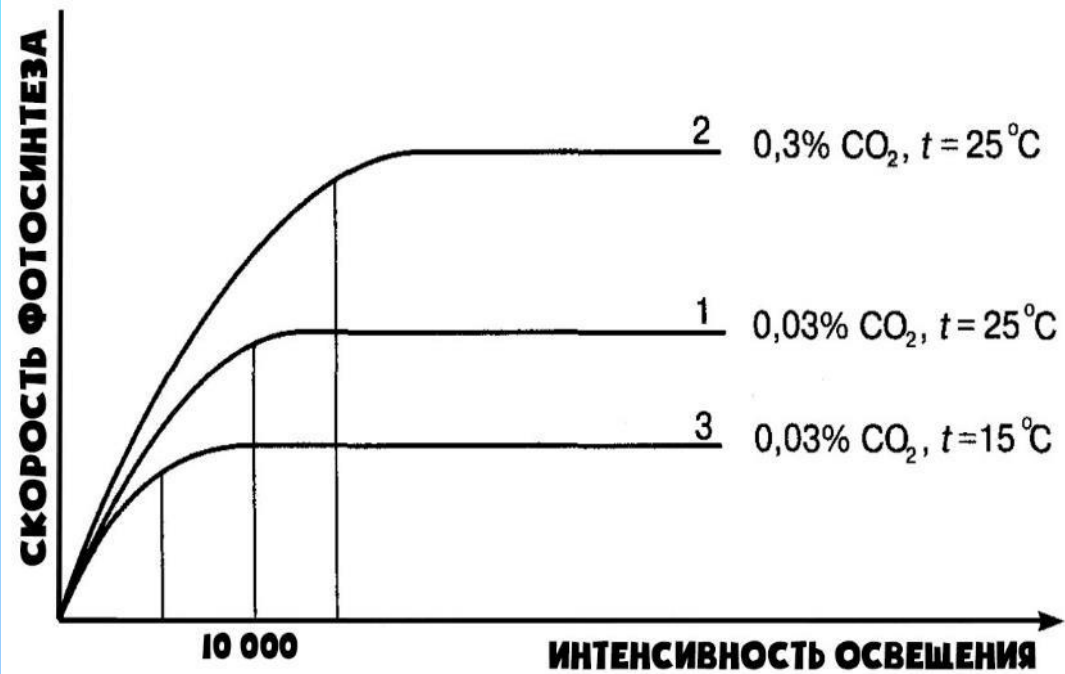
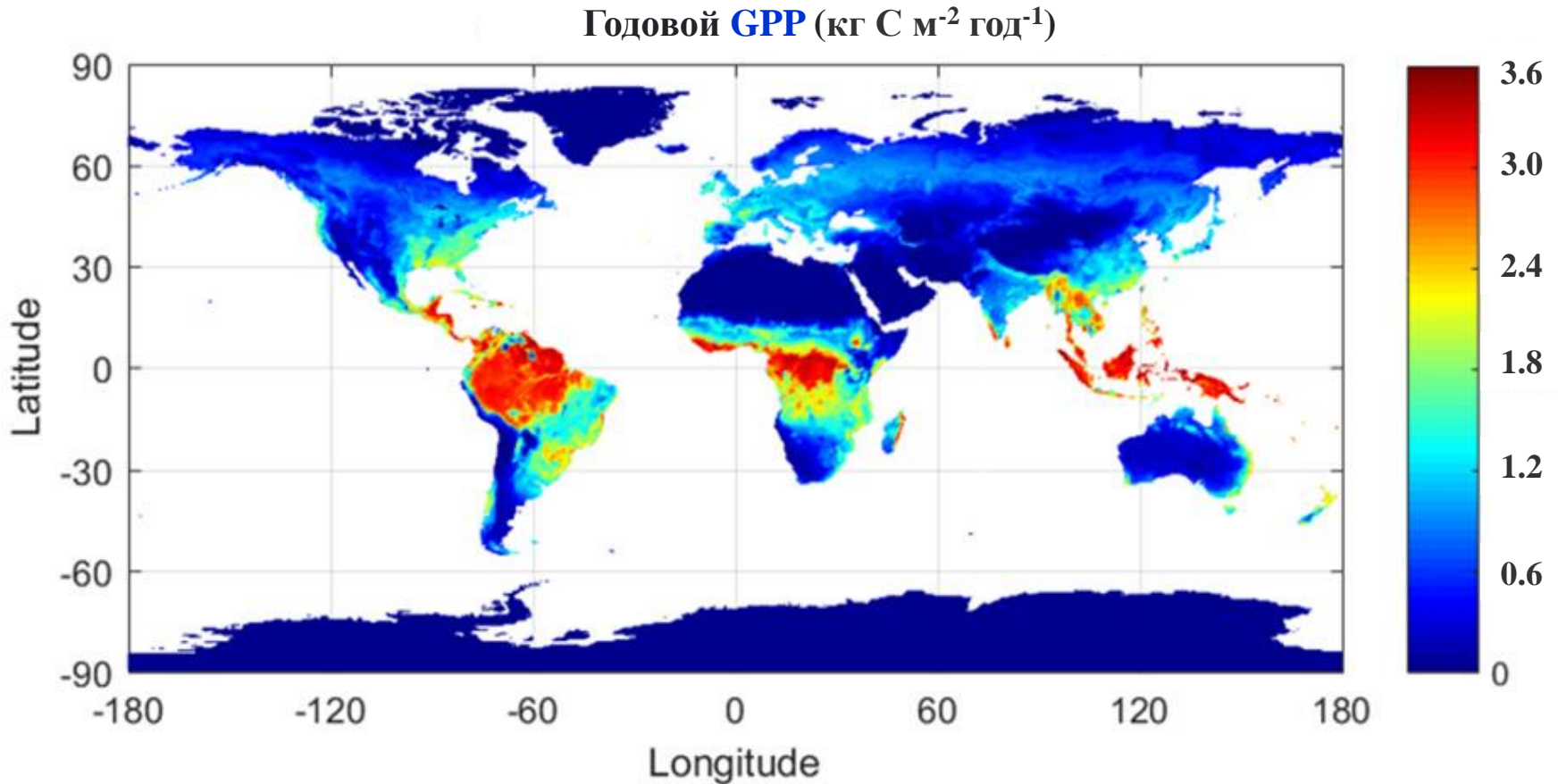


Схема фотосинтезирующей единицы зеленого листа. Скорость фотосинтеза:

$$r [CO_2]_a W / (1 + Wr/V)$$



# Поглощение $\text{CO}_2$ за счет фотосинтеза



**GPP** - брутто-поглощение  $\text{CO}_2$  за счет фотосинтеза в земной растительности (*Ryu, 2019*).

**Интенсивность фотосинтеза** максимальна в **тропических лесах** ( $\geq 3 \text{ кг С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) и уменьшается с увеличением широты со вторичным максимумом  $1 - 1.2 \text{ кг С м}^{-2}$  в лесах **умеренного пояса**. Тропические леса **Амазонки** в некоторых случаях перешли от поглотителя углерода к его источнику.



# Баланс потоков $\text{CO}_2$ в процессе фотосинтеза

**GPP** (gross primary production): **брутто-поглощение**  $\text{CO}_2$  растениями при фотосинтезе.

**NPP** (net primary production): **нетто-поглощение**  $\text{CO}_2$  растениями при фотосинтезе.

**$R_a$** : **выделение**  $\text{CO}_2$  растениями за счет **дыхания**.

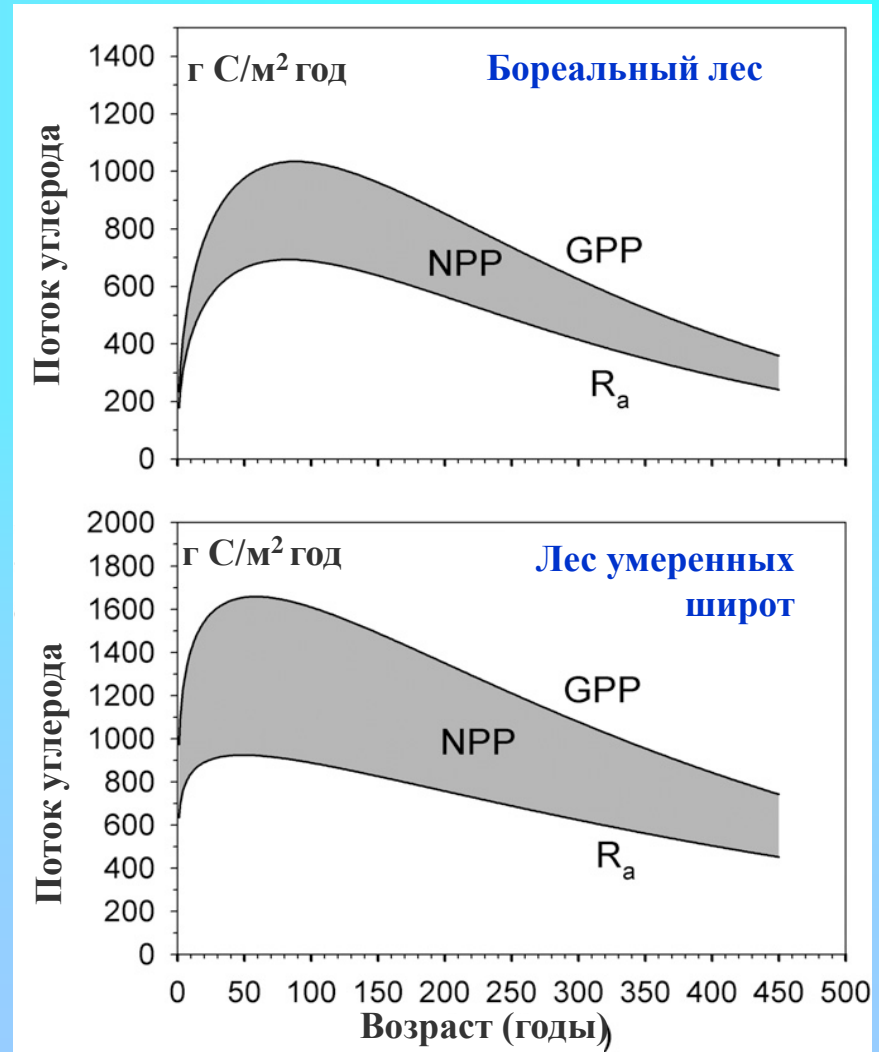
**РФ**: площадь лесов **815 млн. га** (21% в мире).

Поглощение  $\text{CO}_2$  лесами в год: **319 млн. тонн С**.

Удельное поглощение  $\text{CO}_2$  в год: **48 г С/м<sup>2</sup>**.

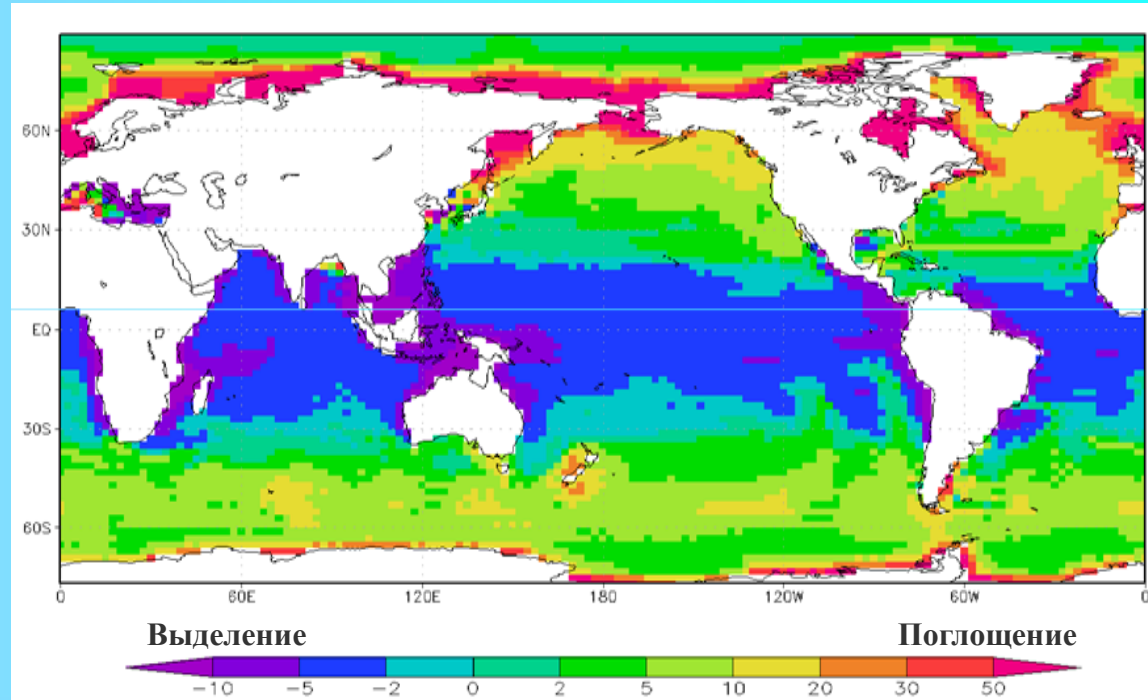
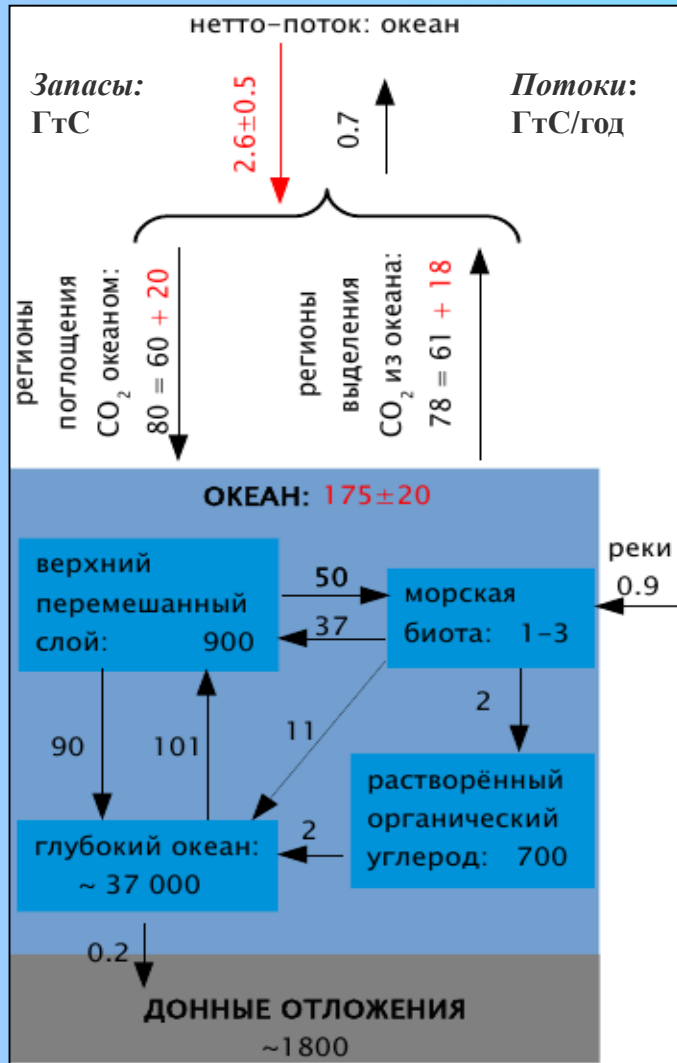
Молодая лиственница (Сахалин): **370 г С/м<sup>2</sup>**.

Поток углерода в зависимости от возраста леса  
(*Tang, Luysaert et al. // PNAS, 2014*)





# Процессы переноса CO<sub>2</sub> в океане



Потоки углерода в океане (среднее за 1991-2000 гг.), г С м<sup>-2</sup> год<sup>-1</sup>.  
*Muryshev et al. // www.researchgate.net/publication/266485152*

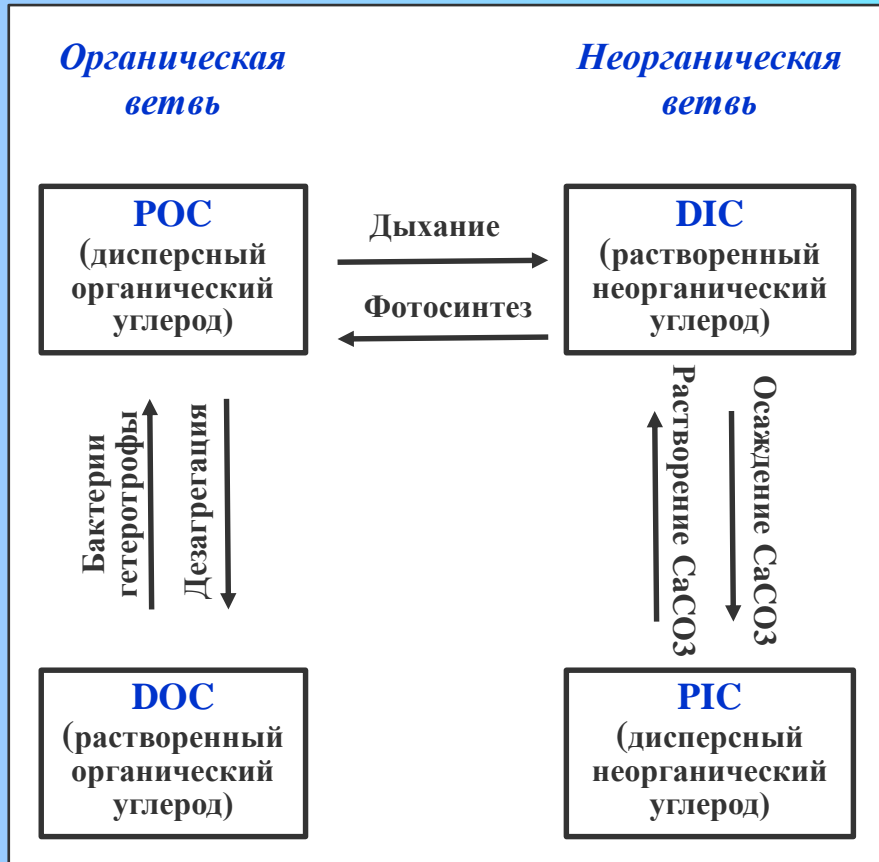
**Океан** - один из самых больших резервуаров углерода в земной системе с запасом **40 тыс. млрд. т углерода** (в **50 раз больше**, чем в **атмосфере**). Однако большая часть этого запаса находится в среднем и глубоком слоях океана с временем отклика порядка нескольких столетий или **тысячелетий**. Основную часть (**98%**) запаса углерода океана составляет растворённый **неорганический углерод**. Основная его масса находится в виде бикарбоната **HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** (**91%**) и карбоната **CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>** (**9%**).





# Процессы переноса CO<sub>2</sub> в океане

## Принципиальная схема процессов обмена углерода в океане



Углерод разделяется на **четыре** отдельных резервуара в зависимости от того, является ли он органическим или неорганическим и растворен ли он или в твердых частицах.

Три основных процесса (или **насоса**), составляющих морской углеродный цикл, доставляют атмосферный углекислый газ во внутренние районы океана:

- (1) насос **растворимости**,
- (2) **карбонатный насос**,
- (3) **биологический насос**.

(1) **Насос растворимости** включает в себя процессы **растворения** CO<sub>2</sub> в морской воде и перенос океанической **циркуляцией**. Поток углекислого газа (на единицу площади) из атмосферы в океан описывается **законом Генри** (*Siegenthaler, Sarmiento, 1993*):

$$f_o = k_{CO_2} \alpha (pCO_{2,a} - pCO_{2,o}),$$

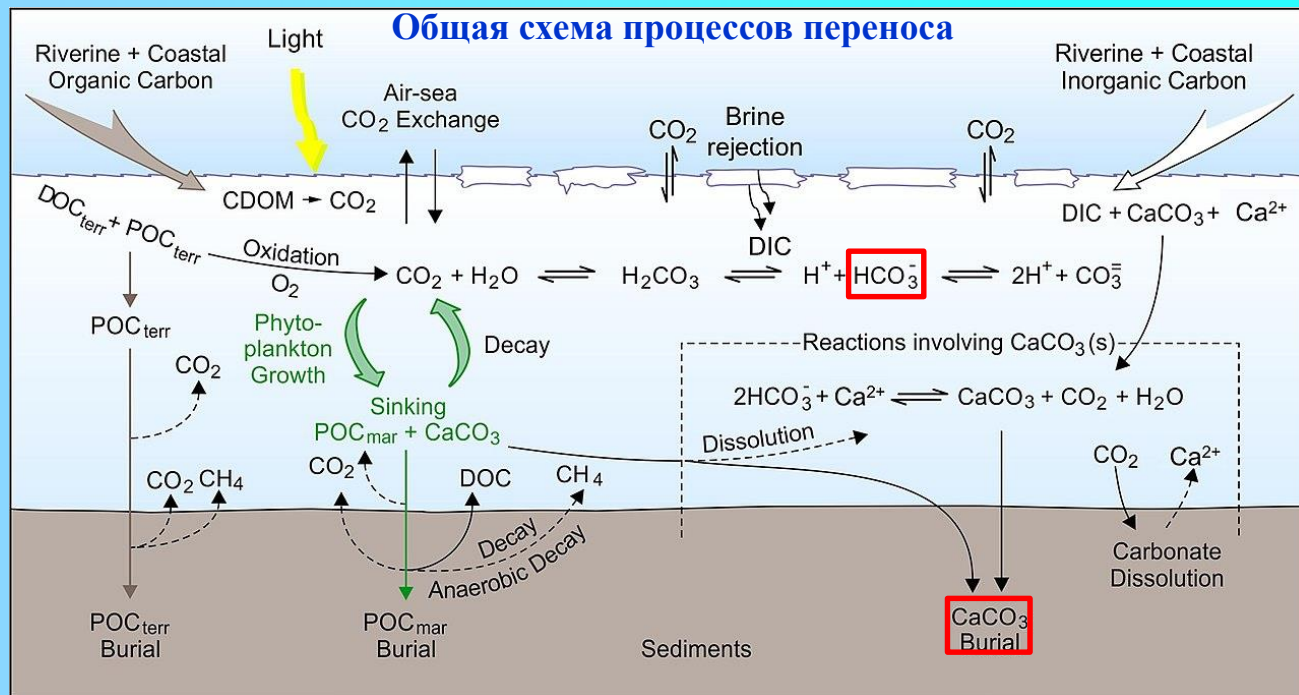
где  $k_{CO_2}$  - коэффициент обмена, который зависит от скорости ветра в приземном слое и характеристик устойчивости этого слоя,  $\alpha$  - растворимость CO<sub>2</sub> в морской воде,  $pCO_{2,a}$  и  $pCO_{2,o}$  - парциальное давление CO<sub>2</sub> в воздухе и в воде соответственно. Накопление CO<sub>2</sub> в атмосфере приводит к поглощению его океаном, а уменьшение концентрации CO<sub>2</sub> - к выделению углекислого газа из океана. Растворимость CO<sub>2</sub> в морской воде уменьшается при увеличении **температуры** (*Weiss et al., 1982*).



# Процессы переноса CO<sub>2</sub> в океане

**(3) Биологический насос** представляет собой биологически обусловленное поглощение углерода океаном из атмосферы и наземного стока во внутренние районы океана и донные отложения. Это часть океанического углеродного цикла, ответственная за круговорот органического вещества, образующегося в основном **фитопланктоном** во время **фотосинтеза**.

Примерно **60 млрд. т** углерода фиксируется морским **фитопланктоном** каждый год, несмотря на то, что они составляют менее **1% от общей фотосинтетической биомассы на Земле**. Насос ежегодно переносит в недра океана около **11 млрд. тонн углерода**.



*Capelle et al., 2020*

**(2) Карбонатный насос** иногда называют компонентом “твердых тканей” биологического насоса. Некоторые поверхностные морские организмы, такие как **кокколитофоры**, производят твердые структуры из карбоната кальция, путем фиксации **бикарбоната**. Эта фиксация является важной частью океанического углеродного цикла:  
$$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

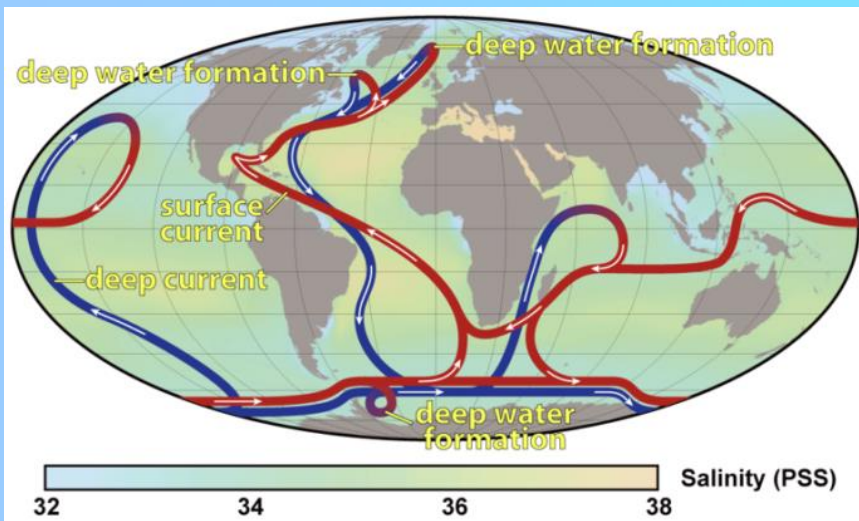
**Кокколитофоры**





# Океанические течения

**Океанические течения** играют огромную роль в формировании климата, перенося на дальние расстояния теплые и холодные массы воды, а также растворенный  $\text{CO}_2$ . Наиболее важные факторы: ветер (**пассаты**), силы **Кориолиса** и **термохалинная циркуляция** — циркуляция, создаваемая за счет перепада плотности воды, образовавшегося вследствие неоднородности распределения **температуры** и **солёности** в океане. Ветровые поверхностные течения (такие как **Гольфстрим**) перемещают воды из экваториальной части Атлантического океана к северу. Эти воды попутно охлаждаются и в итоге за счёт увеличившейся плотности погружаются ко дну (формируя **Северо-Атлантическую глубинную водную массу**). Плотные воды на глубинах перемещаются в сторону, противоположную направлению движения ветровых течений. Изменения в структуре течений, например, замедление или остановка **Гольфстрима** за счет повышения температуры может привести к радикальным изменениям климата на региональном уровне и даже глобально. Яркий пример - явление **Эль-Ниньо**.



Термохалинная циркуляция

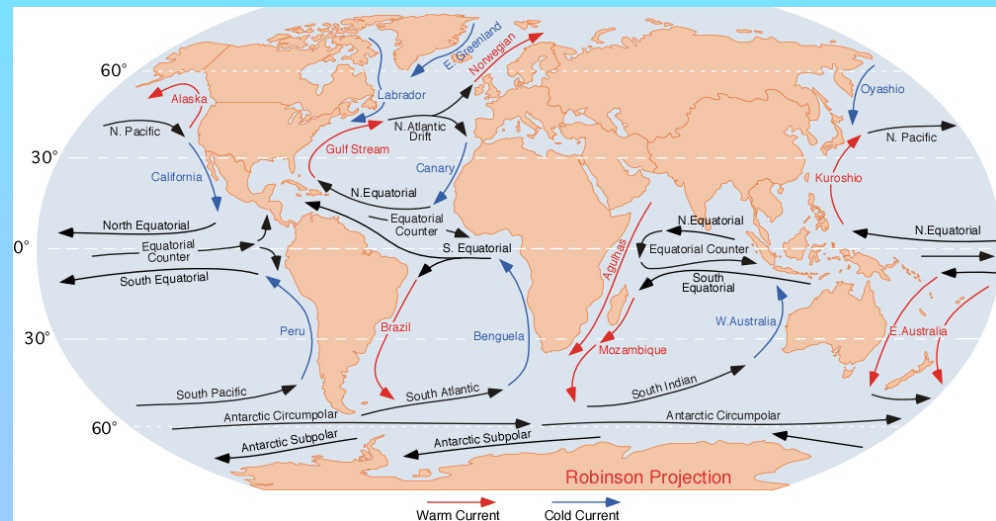


Схема течений в Мировом океане



# Океанические течения

## Эль-Ниньо и Ла-Нинья

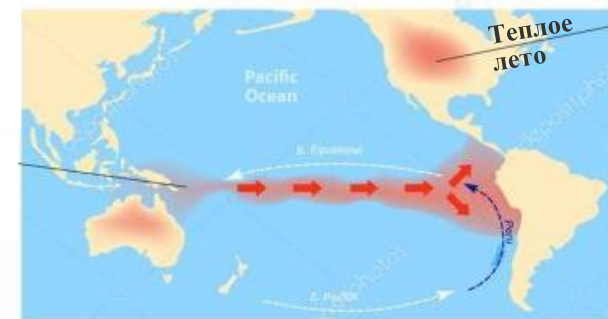
**Эль-Ниньо** (малыш), или Южная осцилляция - колебание температуры поверхностного слоя воды в экваториальной части Тихого океана, в которой область нагретых приповерхностных вод смещается к востоку. При этом ослабевают или прекращаются пассаты, замедляется апвеллинг в восточной части Тихого океана, у берегов Перу. Противоположная фаза осцилляции называется **Ла-Нинья** (малышка). Характерное время осцилляции - от 3 до 8 лет. Эль-Ниньо 1997 - 1998 годов было настолько сильным, что распространились теории о связи Южной осцилляции с **глобальными изменениями климата**.

## Явление Эль-Ниньо

Норма

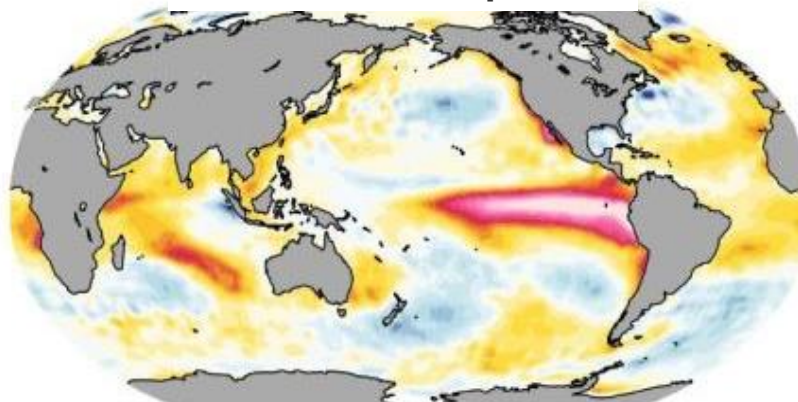


Год Эль-Ниньо

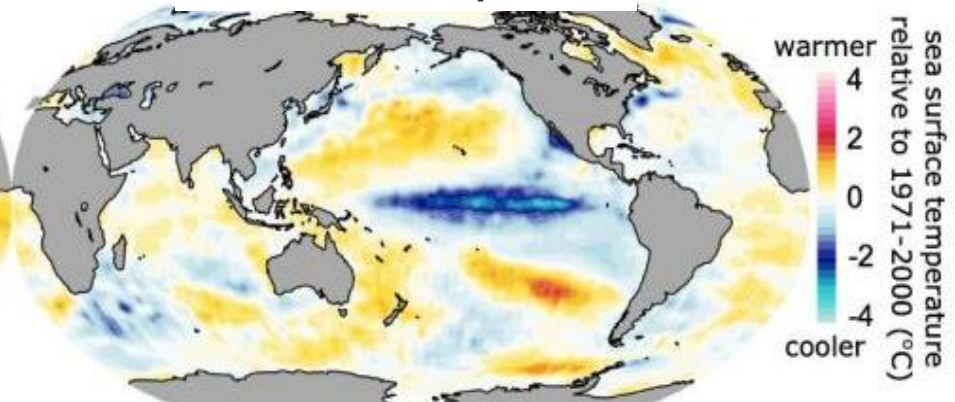


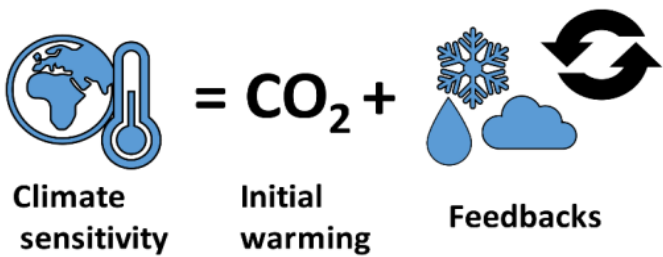
## Поля температур

**Эль-Ниньо: декабрь 1997**

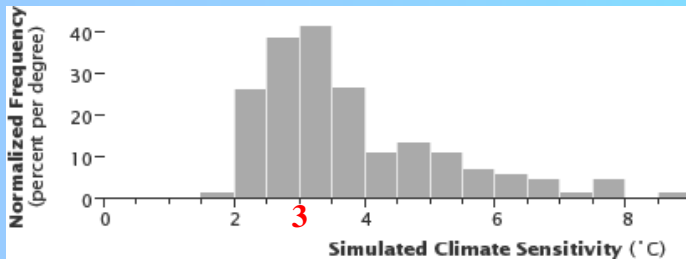


**Ла-Нинья: декабрь 1988**





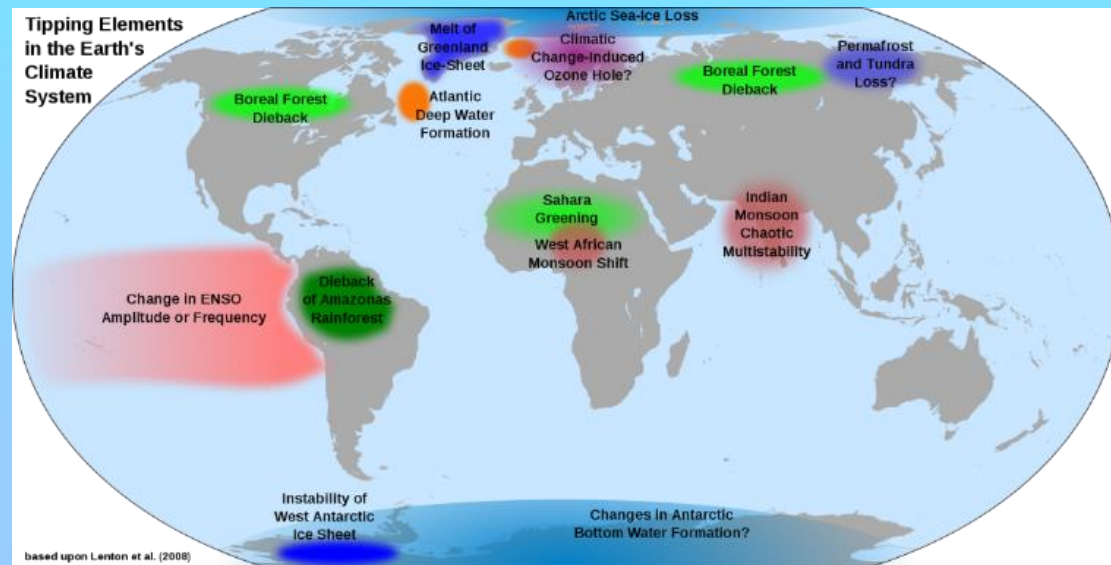
**Равновесная чувствительность климата** – рост температуры нижних слоёв атмосферы при **удвоении** концентрации CO<sub>2</sub>. За счет эффекта **обратных** положительных связей роль CO<sub>2</sub> намного больше, чем в случае только его учета в парниковом эффекте (вклад **20%**).



**Частотное распределение** равновесной чувствительности климата на основе моделирования удвоения CO<sub>2</sub>. Вероятность большого или очень **большого** повышения температуры будет больше, чем вероятность небольшого повышения.

## Обратные связи

**Tipping points** - критические факторы изменения климата - элементы климатической системы, изменения в которых могут существенно повлиять на климат Земли в целом (иначе - **переломные моменты**). В теории динамических систем хорошо известны критические явления, когда небольшие **пороговые** изменения отдельных параметров системы могут приводить к её переходу в **качественно другое состояние**. Например, **бифуркация** или воздействие **шума**. Насчитано около **15** значимых **переломных моментов** в климатической системе планеты. Наименее устойчивыми к глобальному потеплению и наиболее близкими к **точке невозврата** являются коралловые рифы, ледяные щиты Западной Антарктики и Гренландии, леса Амазонки. Другие примеры - **Эль-Ниньо, Гольфстрим**.





# Обратная связь между климатом и углеродным циклом

Два типа взаимодействия: (1) **прямое** воздействие изменения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере на углеродный цикл (эффект фертилизации растений углекислым газом атмосферы и изменение множителя в законе Генри для поверхности океана); (2) **косвенное** воздействие изменения  $[\text{CO}_2]_a$  на углеродный цикл, связанное с изменениями климата при развитии соответствующего **парникового** возмущающего воздействия. В англоязычной литературе они получили названия "**carbon-concentration feedback**" и "**carbon-climate feedback**" соответственно.

В **линейном** приближении потоки  $\text{CO}_2$  из атмосферы на сушу и в океан за конечный промежуток времени можно представить в виде (*Friedlingstein et al., 2003*):

$$\text{Суша: } G_L = \beta_L \Delta[\text{CO}_2]_a + \gamma_L \Delta T_g$$

$$\text{Океан: } G_O = \beta_O \Delta[\text{CO}_2]_a + \gamma_O \Delta T_g$$

$$\text{Суммарно: } G = G_L + G_O = \beta \Delta[\text{CO}_2]_a + \gamma \Delta T_g$$

$$\beta = \beta_L + \beta_O$$

$$\gamma = \gamma_L + \gamma_O$$

В проекте **C4 MIP** (Coupled Climate-Carbon Cycle Models Intercomparison Project) (*Friedlingstein et al., 2006*) было проведено сравнение характеристик **обратной связи** между климатом и углеродным циклом. Показано, что  $\beta_L$  и  $\beta_O$  **положительны** - эффекты группы (1) усиливают поглощение  $\text{CO}_2$  из атмосферы при увеличении  $[\text{CO}_2]_a$ . В свою очередь,  $\gamma_L$  и  $\gamma_O$  **отрицательны**, что соответствует положительной обратной связи. Для большинства моделей  $|\gamma_L| \gg |\gamma_O|$ , так что обратная связь между климатом и углеродным циклом определяется, в основном, **наземными** экосистемами.

## Устойчивость земной системы.

Несмотря на положительную обратную связь между климатом и углеродным циклом, **противоположные** относительно друг друга знаки  $\gamma$  и  $\beta$  способствуют устойчивости глобальной земной системы при внешних эмиссиях углекислого газа в атмосферу. Если  $\text{CO}_2$  выбрасывается в течение некоторого времени, а затем эта эмиссия становится равной нулю, то после достаточно длительного интервала времени земная система, как ожидается, должна прийти в состояние **нового равновесия**.

# Обратная связь между климатом и углеродным циклом

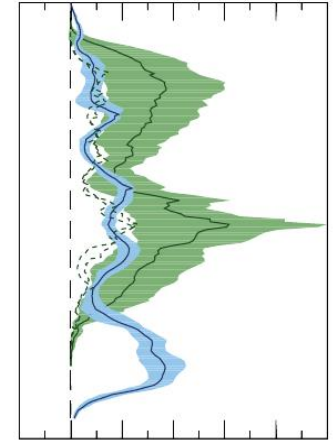
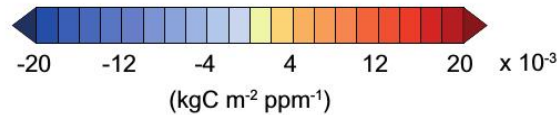
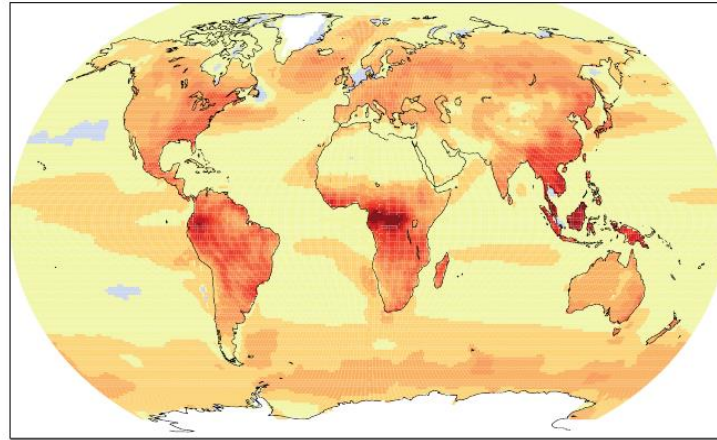
Поток  $\text{CO}_2$  из атмосферы на сушу и в океан:  
 $\beta \Delta[\text{CO}_2]_a + \gamma \Delta T_g$

Пространственное распределение средних по ансамблю моделей значений  $\beta = \beta_L + \beta_O$  и  $\gamma = \gamma_L + \gamma_O$  в численном эксперименте с увеличением  $[\text{CO}_2]_a$  на 1%/год вплоть до четырёхкратного увеличения относительно доиндустриального значения.

В ансамбль включены модели BCC-CSM1, CanESM2, CESM1-BGC, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR и NorESM1-ME.  
 (Climate Change 2013, рис. 6.22)

Елисеев // Фундаментальная и прикладная климатология, 2017

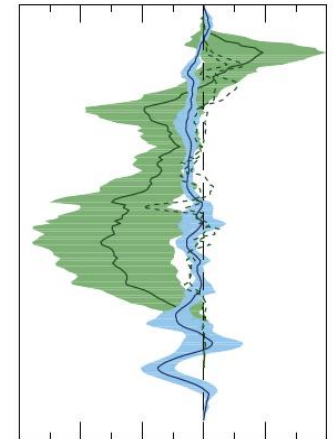
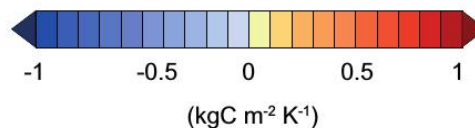
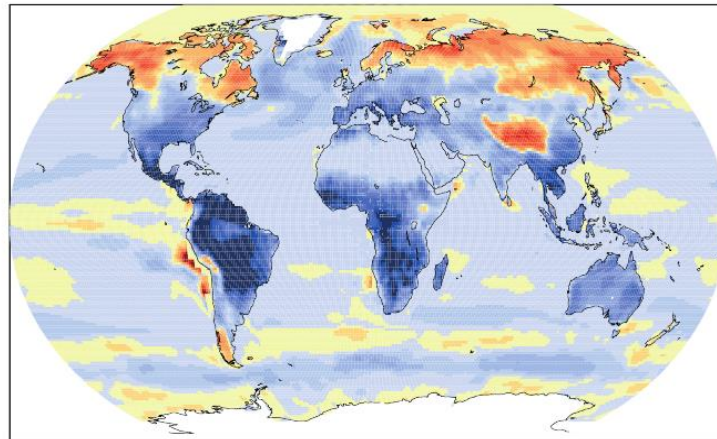
a. Regional carbon-concentration feedback  $\beta = \beta_L + \beta_O$



0   0.10   0.20  
 ( $10^6 \text{ kgC m}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ )

Land  
 Ocean

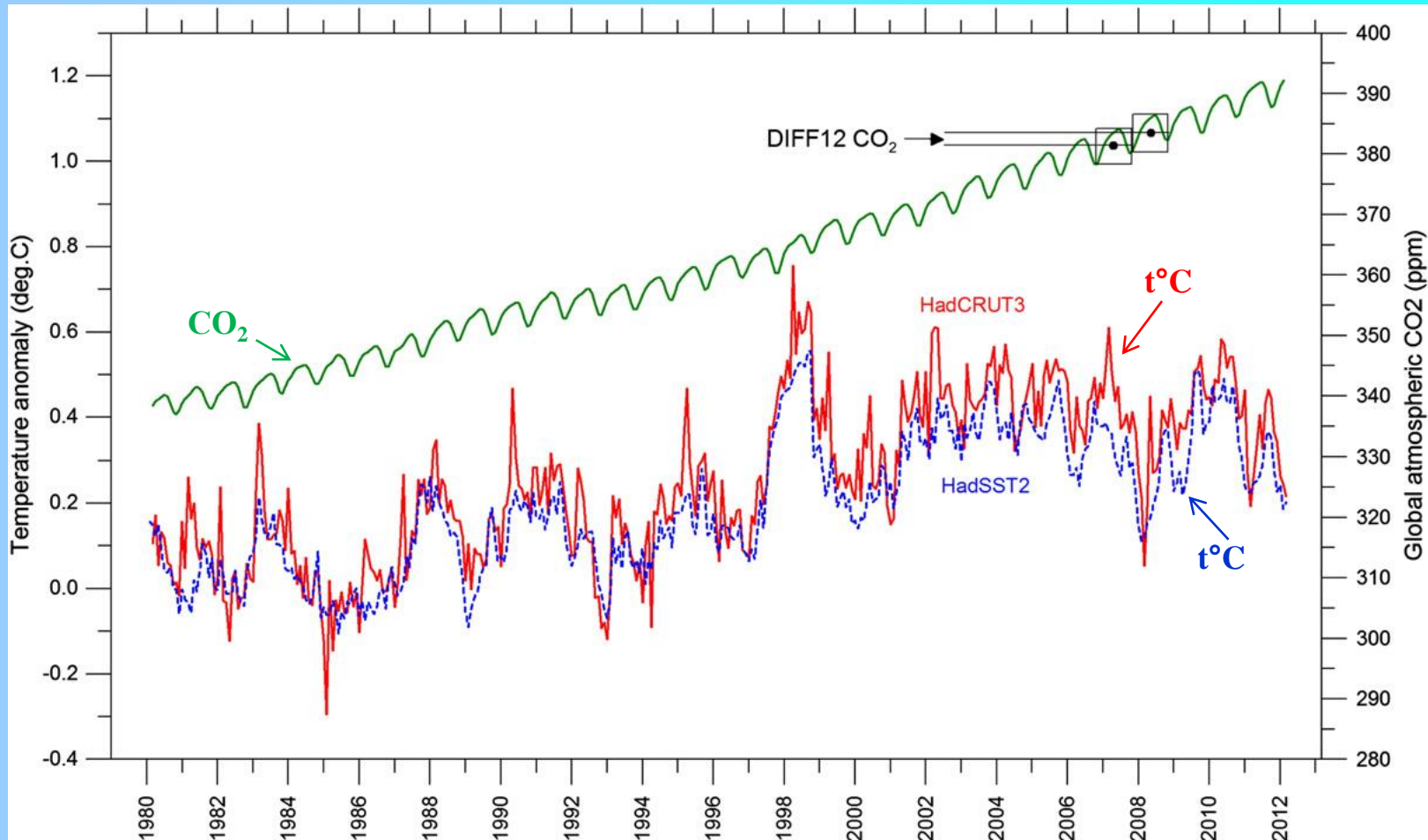
b. Regional carbon-climate feedback  $\gamma = \gamma_L + \gamma_O$



-10   0   10  
 ( $10^6 \text{ kgC m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )



# Корреляции: температура – концентрация CO<sub>2</sub>

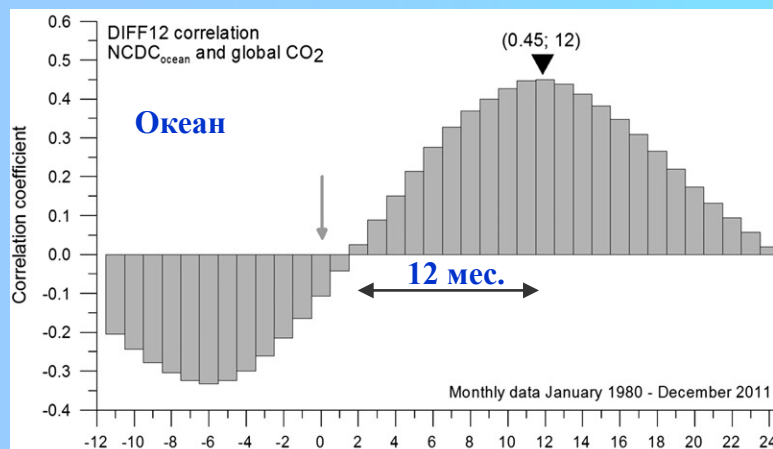
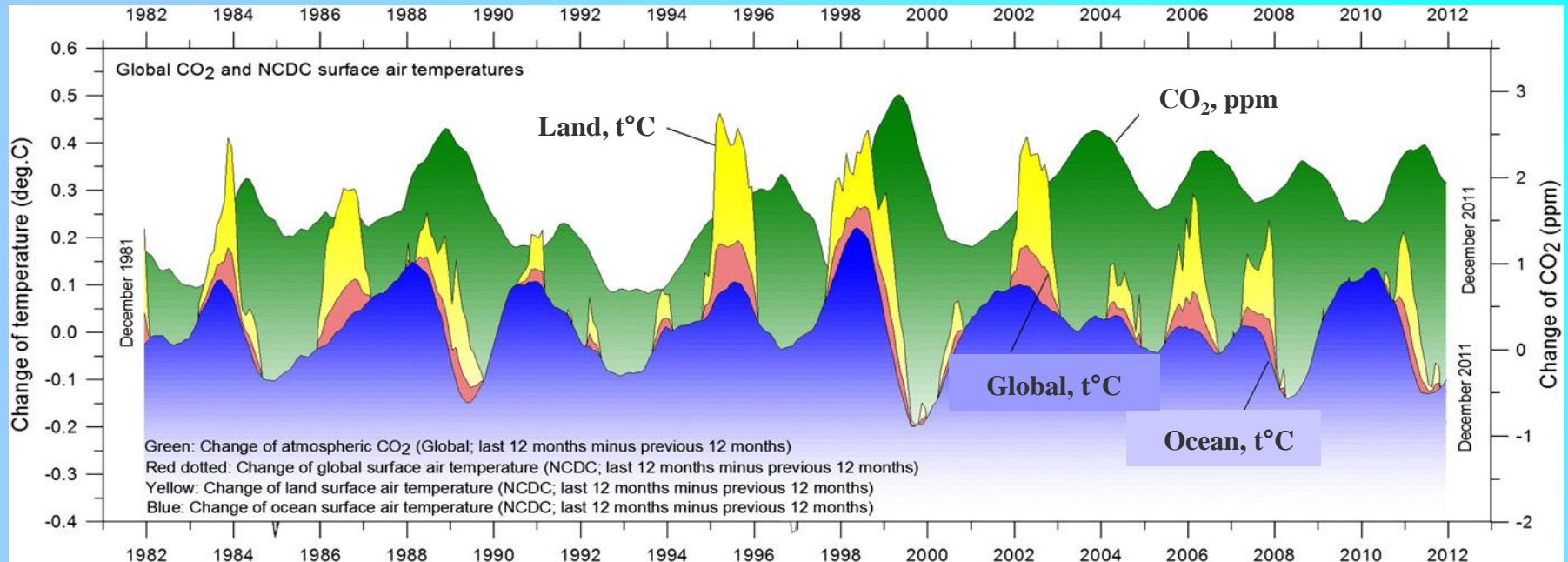


Monthly global atmospheric CO<sub>2</sub> (NOOA; green), monthly global sea surface temperature (HadSST2; blue) and monthly global surface air temperature (HadCRUT3; red).





# Корреляции: температура – концентрация CO<sub>2</sub>



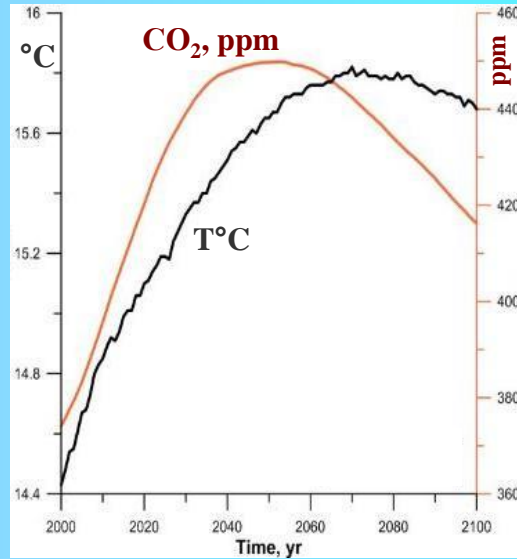
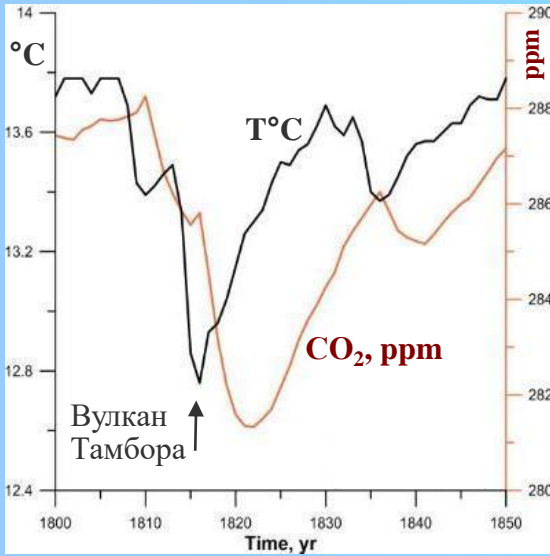
**Коэффициенты корреляции между температурами приземного воздуха (а: суша; б: океан; с: глобальный) и глобальным атмосферным CO<sub>2</sub> для различных месячных интервалов CO<sub>2</sub>. Так, для океана максимальная положительная корреляция обнаружена для CO<sub>2</sub>, отстающего на 12 месяцев от температуры воздуха. Цифры в скобках показывают максимальный коэффициент корреляции и временной лаг CO<sub>2</sub> в месяцах.**

**Выводы этой и ряда других работ:**

**Изменения температуры приводят к изменению концентрации CO<sub>2</sub>, а не наоборот!**



# Временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO<sub>2</sub> в атмосфере



Период	MIROC-ESM	КМ ИФА РАН
1800 - 1849	8	4
2006 - 2100	-15	-8

Временные лаги  $\Delta\tau$  (годы) между изменениями глобальной температуры  $T$  и содержанием CO<sub>2</sub> в атмосфере [CO<sub>2</sub>], полученными при моделировании с помощью MIROC-ESM и КМ ИФА РАН.

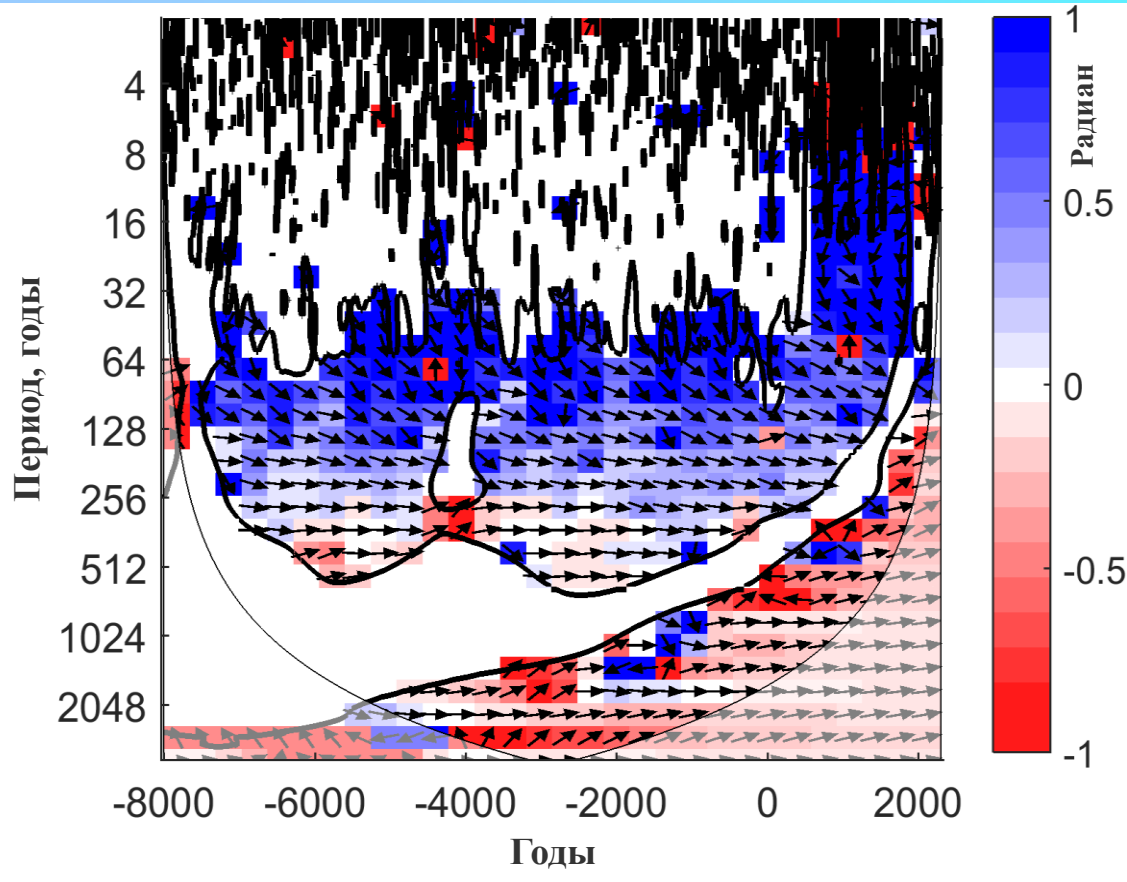
Если  $\Delta\tau > 0$ :  $T$  опережает [CO<sub>2</sub>].  
Если  $\Delta\tau < 0$ : [CO<sub>2</sub>] опережает  $T$ .

Изменения температуры  $T$  и [CO<sub>2</sub>] в моделировании с использованием RCP 2.6 и климатической модели ИФА РАН

Когда антропогенные выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу невелики, изменения в  $T$  в основном обусловлены вулканической активностью или вариациями солнечной радиации. Изменения [CO<sub>2</sub>] задерживаются относительно изменений  $T$  на несколько лет. Например, в 1815 году произошло извержение вулкана Тамбора, которое было самым сильным за последние несколько столетий. При моделировании с КМ ИФА РАН реакция на это заключалась в снижении  $T$  в течение следующих нескольких лет на 1 К. Показано, что при внешнем воздействии в виде выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу временной лаг  $\Delta\tau$  между изменениями [CO<sub>2</sub>] и  $T$  пропорционален значению равновесной чувствительности модели к атмосферному CO<sub>2</sub> (рост температуры при удвоении [CO<sub>2</sub>] равен 2,2 К в модели ИФА РАН) и меняет знак!



# Временной лаг между изменениями глобальной температуры и содержанием CO<sub>2</sub> в атмосфере



Квадратичная вейвлет-когерентность между температурой  $T$  и концентрацией  $CO_2$ , полученная при моделировании голоцена с помощью КМ ИФА РАН. Уровень значимости 5% на фоне красного шума показан в виде толстого контура. Относительное соотношение фаз показано в виде стрелок (в фазе - вправо, противофазе - влево, и  $T$ , опережающая  $[CO_2]$  на  $\pi/2$ , - стрелка прямо вниз). Цветная полоса справа указывает значение сдвига фазы между  $T$  и  $CO_2$  в радианах (синий -  $T$ , опережающая  $[CO_2]$ , красный -  $[CO_2]$ , опережающая  $T$ ).

Показано, что лаг между изменениями переменных, определяемый методами корреляционного и регрессионного анализа, **не характеризует** причинно-следственные связи между ними в общем случае.



# Резюме: Мир

## Демонстрация выгоды от сокращения эмиссии CO<sub>2</sub>

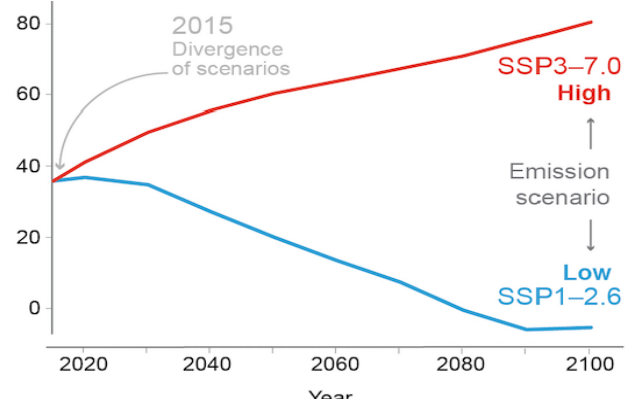
2 сценария выбросов CO<sub>2</sub> и их влияния на глобальную температуру поверхности Земли: сценарий с низким уровнем выбросов (SSP1-2.6, синий) и сценарий с высоким уровнем выбросов (SSP3-7.0, красный).

В сценарии с низким уровнем выбросов выбросы CO<sub>2</sub> начинают снижаться в 2020 году до нуля к концу века, в то время как в сценарии с высоким уровнем выбросов они продолжают увеличиваться на протяжении всего 21 века. Толстые линии - это среднее значение десяти отдельных симуляций (тонкая линия) для каждого сценария.

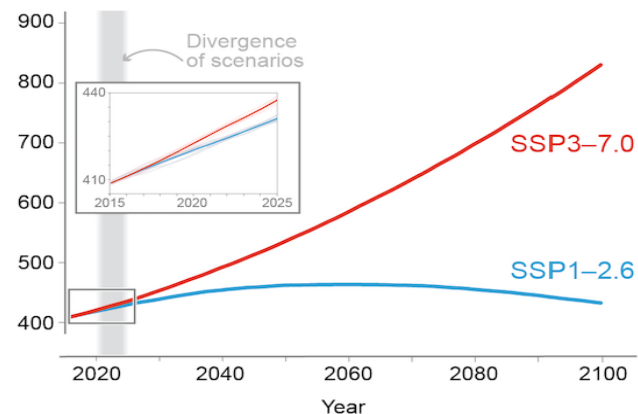
Различия между отдельными моделями отражают естественную изменчивость.

Различия для 2 сценариев начинает проявляться через 5 – 10 лет для концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере и через 20 – 30 лет для температуры Земли. Если произойдет крупное извержение вулкана (что ожидается в ближайшие 100 лет), то возникнут сильные возмущения хода температуры, что еще более затруднит анализ климатических изменений.

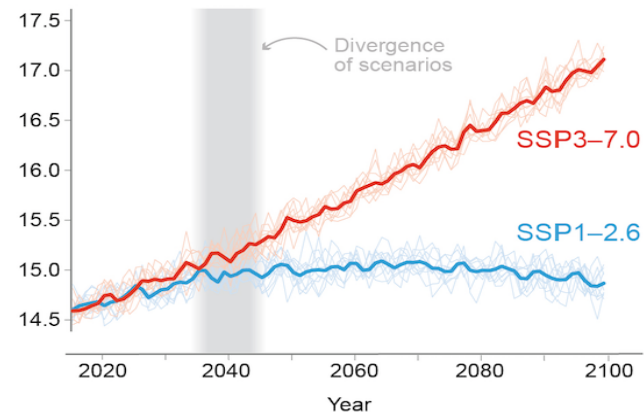
Выбросы CO<sub>2</sub> (Гт CO<sub>2</sub>/год)



Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере (ppm)



Глобальная температура поверхности (t°C)





# Резюме: Россия

В России потепление идет с существенно более высокой скоростью **2°C/40 лет**, а в мире **0,8°C/40 лет**, то есть в **2,5 раз быстрее!**

2020 г.	CO <sub>2</sub> млн. т	Население млн.	CO <sub>2</sub> /чел т/чел	Доля
China	9 894	1 471	6.7	30.9%
US	4 432	331	13.4	13.9%
EU	2 858	513	5.6	8.9%
India	2 298	1 380	1.7	7.2%
<b>Russia</b>	<b>1 432</b>	<b>146</b>	<b>9.8</b>	<b>4.5%</b>
Japan	1 027	126	8.1	3.2%
World	31 984	7 795	4.1	100.0%



**Выбросы ПГ в мире**

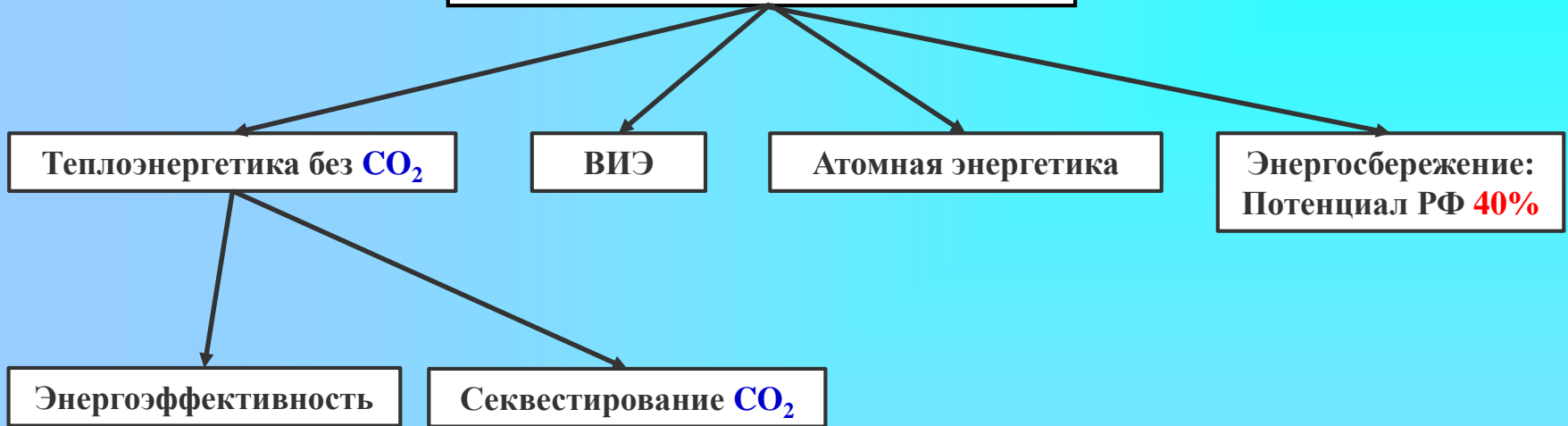
В **2017** году эмиссия парниковых газов в стране без учета абсорбирующего эффекта лесов составляла **67,6 %** уровня 1990 года, а с учетом абсорбирующего эффекта лесов - **50,7%**.  
*«Энергетическая стратегия РФ до 2035 г.»*



**Энергетические технологии,  
удовлетворяющие  
требованиям сокращения  
выбросов CO<sub>2</sub>**



## Основные направления снижения выбросов CO<sub>2</sub>



	Выбросы парниковых газов, т CO <sub>2</sub> -экв./ГВт·ч	Относительные выбросы
Уголь	820	1.00
Газ	490	0.60
ФЭУ	48	0.06
АЭС	12	0.015
ВЭС	11	0.013



# Цикл Аллама на природном газе

Сжигание природного газа в  $O_2$ :  $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Нет выбросов  $CO_2$  в атмосферу!

Теплоноситель – **сверхкритический  $CO_2$** .

Параметры цикла:  **$1150^\circ C$ , 300 атм.**

КПД нетто **59%**.

Нормированная себестоимость составит **6 цент/кВт ч !**

Пилотный стенд на газе **50 МВт (т)** в Хьюстоне (2018 г.).

Создана **турбина** на сверхкритическом  $CO_2$  (Тошиба).

Коммерческий проект на газе **300 МВт (э)**.

Разработчик: **NET Power**. Заказы на 2 ТЭС по **280 МВт (э)**.

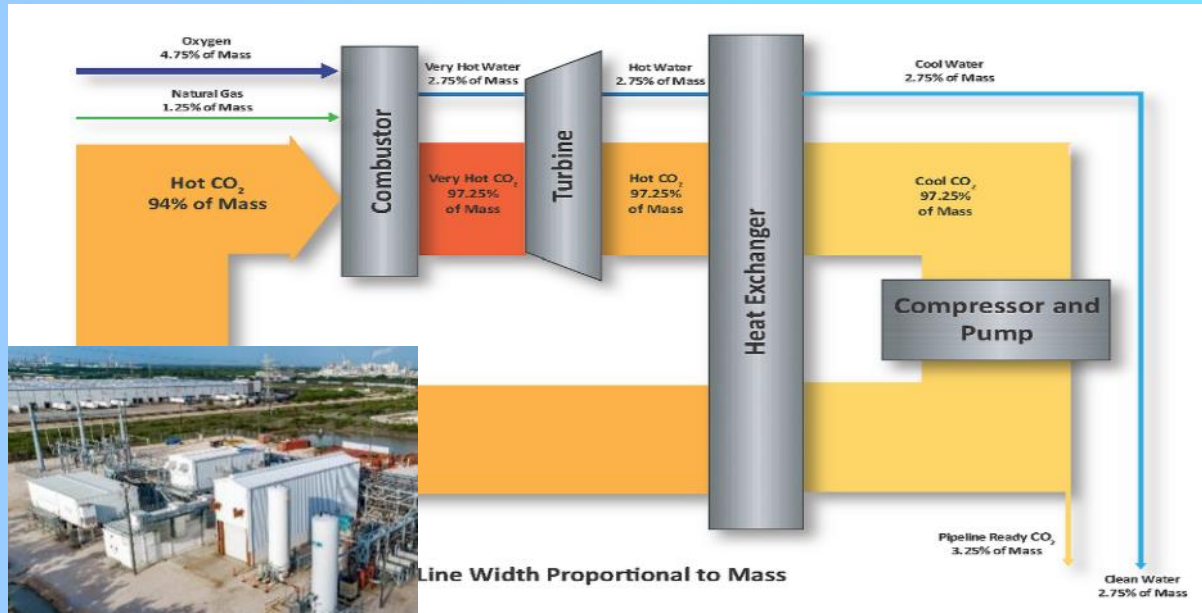
Если потребовать секвестирование  $CO_2$  для ПГУ, то их КПД упадет до **40 - 50%** вместо 50 - 60%.



**Родни Аллам** (Великобритания)  
– лауреат Нобелевской премии.

**Цикл ОИВТ** на природном газе с **бескомпрессорной** парогазовой установкой – *аналог*.

**КНТП «Энергетика больших мощностей нового поколения»:**  
**Проект 4.** Создание опытно-промышленного кислородно-топливного энергетического комплекса с нулевыми выбросами на сверхкритическом диоксиде углерода.

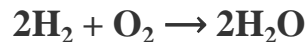






# Водородная энергетика (экономика)

**Водород** - вторичный энергоноситель. **Водород** - наиболее емкий и экологически чистый энергоноситель из всех существующих химических веществ. Единственным продуктом реакции является **вода**:

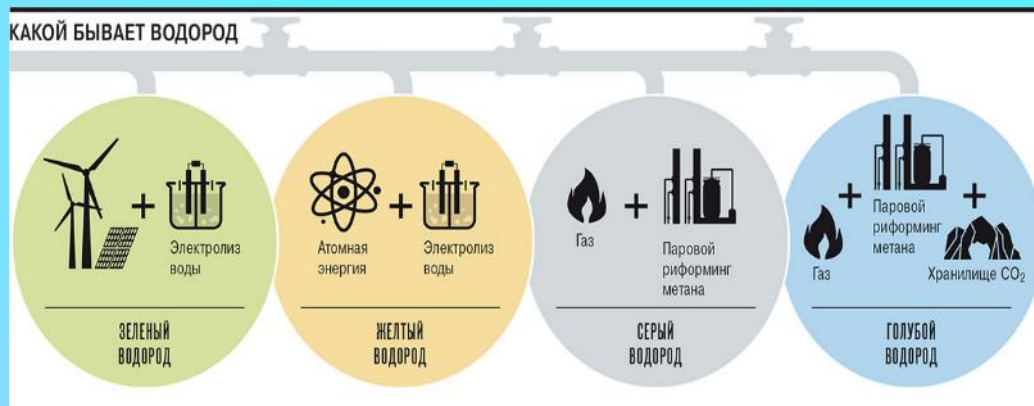


Теплота сгорания **водорода** в **2,5** раза выше, чем у природного газа. **Водород** может использоваться: в процессах эффективного **сжигания**; для прямого преобразования энергии в **топливных элементах** с высоким КПД; как сырье для многих **химических продуктов**. Среди главных проблем - **безопасность**.

Самый эффективный способ получения **H<sub>2</sub>** - метод паровой конверсии **природного газа**. Однако, в будущем предполагается, что основным источником водорода будет **электролиз воды** в атомной (или возобновляемой) энергетике.

Возможно использовать **газификацию угля**. В последнем случае имеется в виду, что вначале путем газификации угля будет получаться **синтез-газ** (смесь **H<sub>2</sub>** и **CO**), а из него уже извлекается водород. Приведенные затраты на производство:

«серого» водорода - **€1,24 за 1 кг**, а «зеленого» - в **€3,43 за 1 кг**.



Исходя из свойств **водорода**, его использование в **энергетике** сомнительно.

**Муравьиная кислота HCOOH** и **аммиак NH<sub>3</sub>** рассматриваются как наиболее перспективные химические носители водорода.



# Заключение

## ВЫВОДЫ:

- При любых реальных сценариях развития энергетики глобальное **потепление продолжится** и уровень в **1,5°C** будет достигнут в середине столетия, но далее прогнозы расходятся, и результат может зависеть от **действий** человеческого сообщества.
- Парижское соглашение не может быть реализовано в полной мере, но глобальная **декарбонизация энергетики** неизбежна.
- В **России** потепление климата идет более высокими темпами (в **2,5 раз** быстрее) и ведет к значительному **сокращению** потребности в топливе (до **15%**), в основном из-за снижения расходов на теплоснабжение.

## РЕКОМЕНДАЦИИ:

- Последовательно осуществлять **декарбонизацию энергетики** со скоростями, не превосходящими **экономические возможности** страны.
- Сосредоточить усилия на повышении интенсивности **биосферного стока** (лесоразведение, борьба с лесными пожарами и др.).
- Дальнейшее развитие **климатических моделей** Земли с использованием **бенчмаркинга**.
- Организация систем климатического **мониторинга**.
- В силу неизбежности изменений климата разрабатывать адекватные меры по **адаптации** человеческого общества к существованию в новых условиях.



Геотермальный источник в Исландии

**Спасибо за внимание!**