

Углеродный цикл в Земной системе: обзор

А.В. Елисеев

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,
Казанский (Приволжский) федеральный
университет

XII сибирское совещание и школа молодых ученых
по климато-экологическому мониторингу

Основные биогеохимические циклы

– углеродный:

углекислый газ CO_2 , метан CH_4 , сажевые и органические аэрозоли, ...

– азотный:

закись азота N_2O , NO_x , нутриенты для растительности, ...

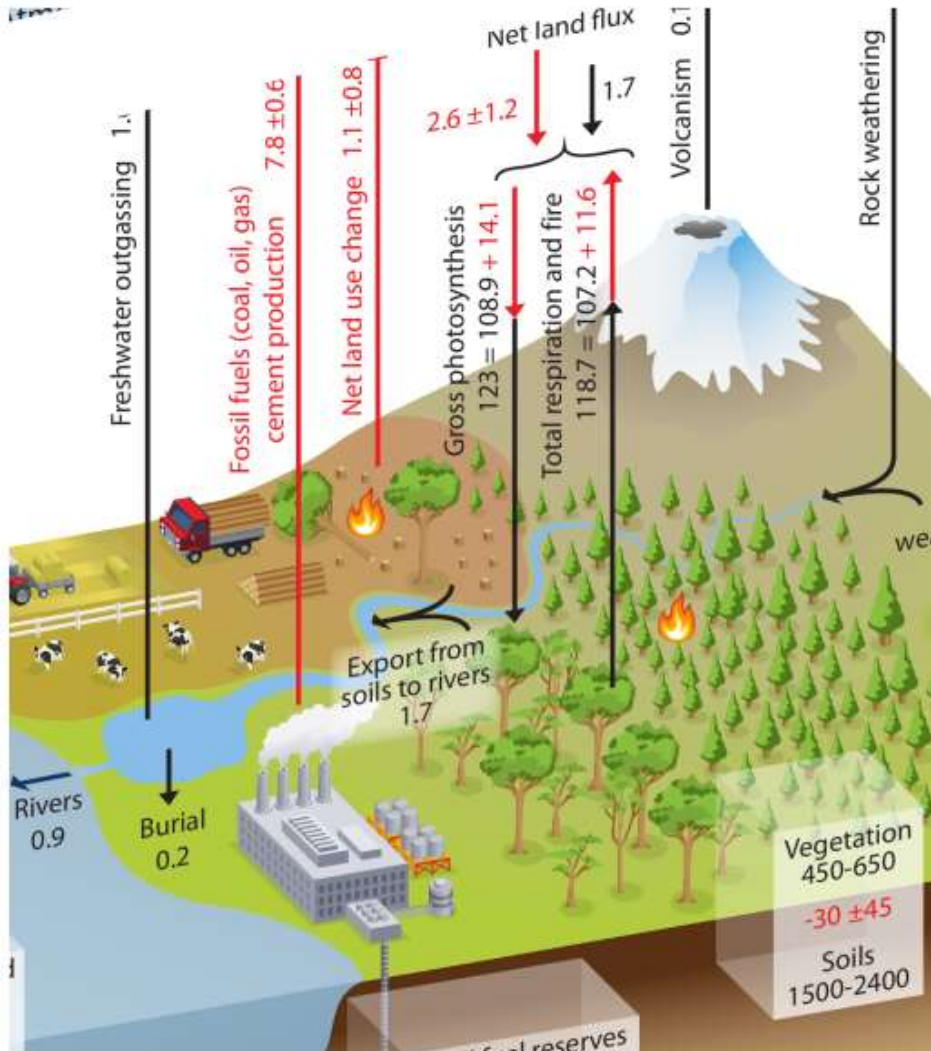
– фосфорный

– ...

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЛОБАЛЬНОМ УГЛЕРОДНОМ ЦИКЛЕ

Наземный углеродный цикл (1)

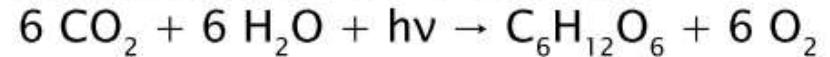
[IPCC AR5]



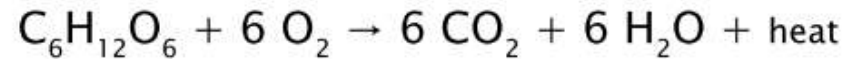
Поглощение CO_2

$$F_l = F_p - F_v - F_s - F_f$$

F_p – интенсивность фотосинтеза:



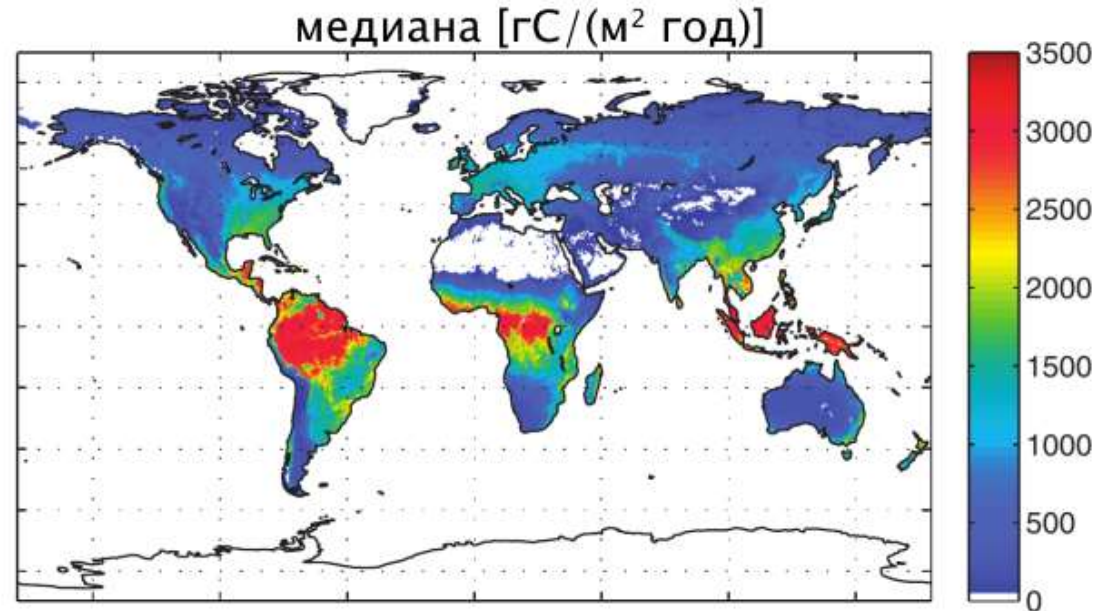
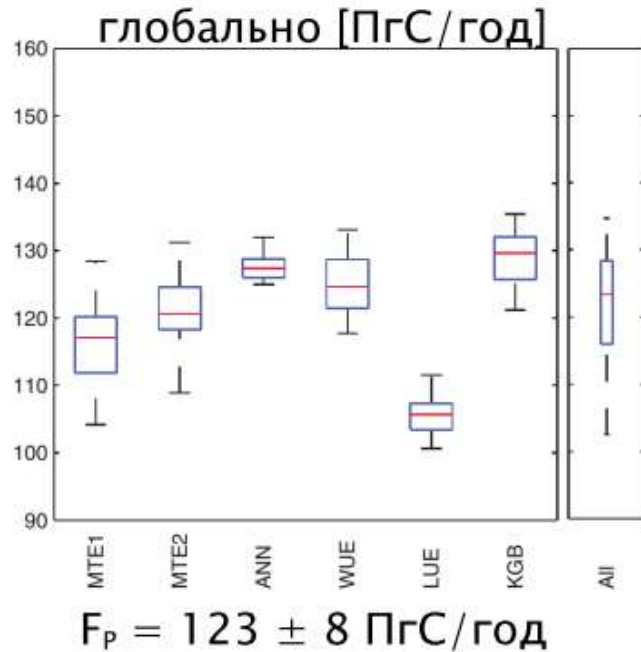
F_v – автотрофное дыхание (дыхание растений)



F_s – гетеротрофное дыхание (разложение органики почвы бактериями, микробами и археями)

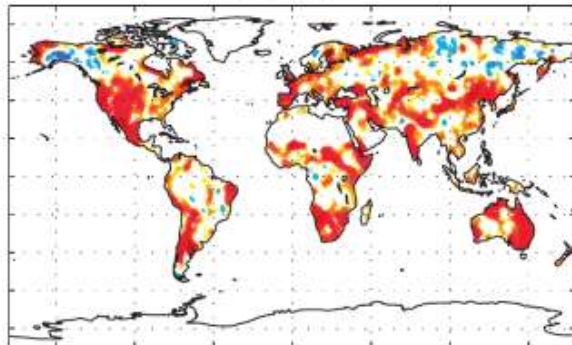
F_f – выделение CO_2 из-за природных пожаров

Интенсивность фотосинтеза [Beer et al., 2010]

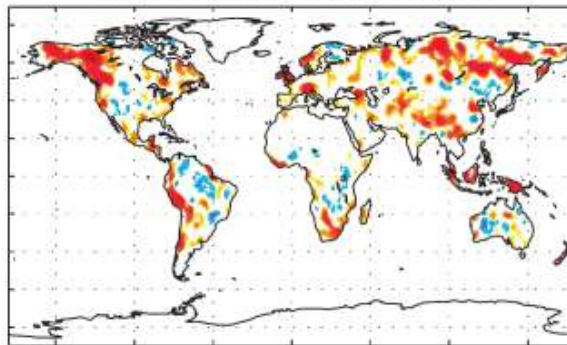


корреляции с климатическим переменными

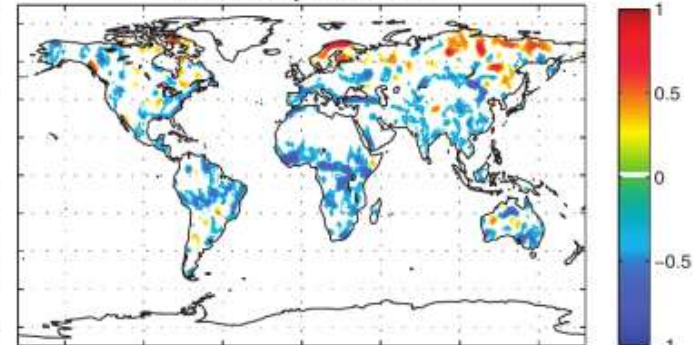
осадки



приземная температура



коротковолновая радиация на поверхности



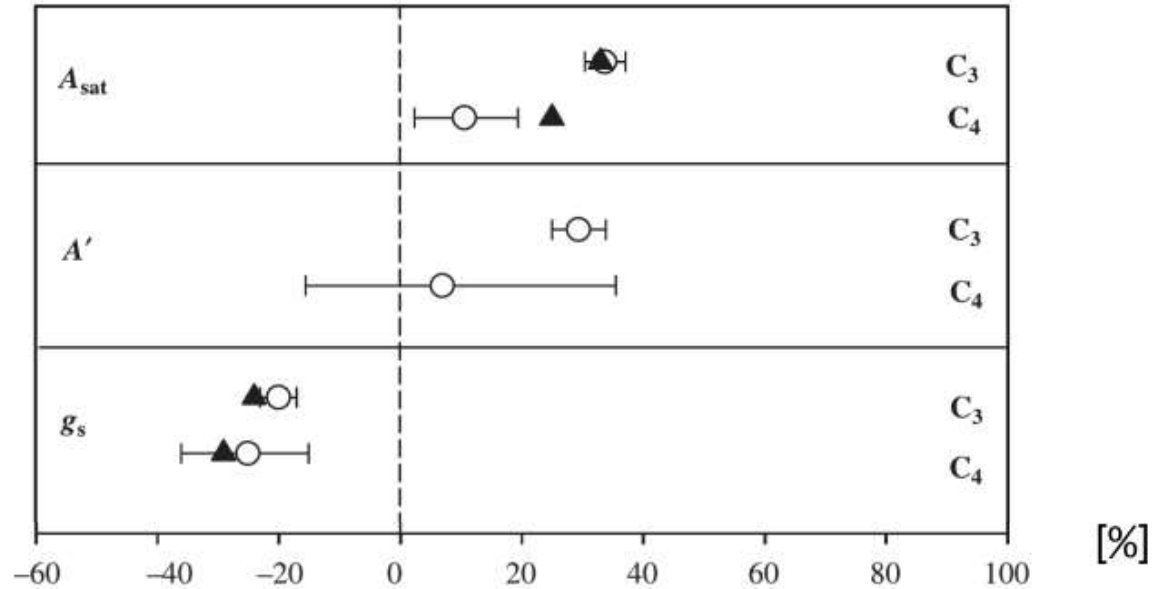
Эффект фертилизации растений атмосферным CO₂: эксперименты FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) [Ainsworth, Long, 2005]

Изменение при искусственном увеличении q_{CO_2}

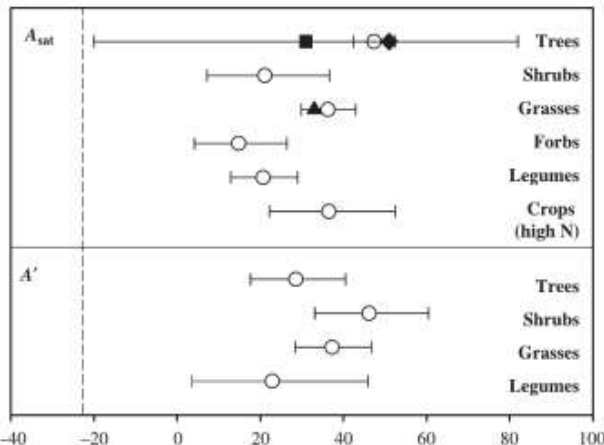
насыщающая ИФ
(без ограничения ФАР)

ИФ за сутки

устычная проводимость



растения C₃

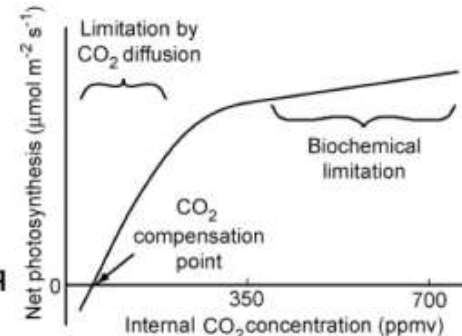


закон Михаэлиса-Ментен:

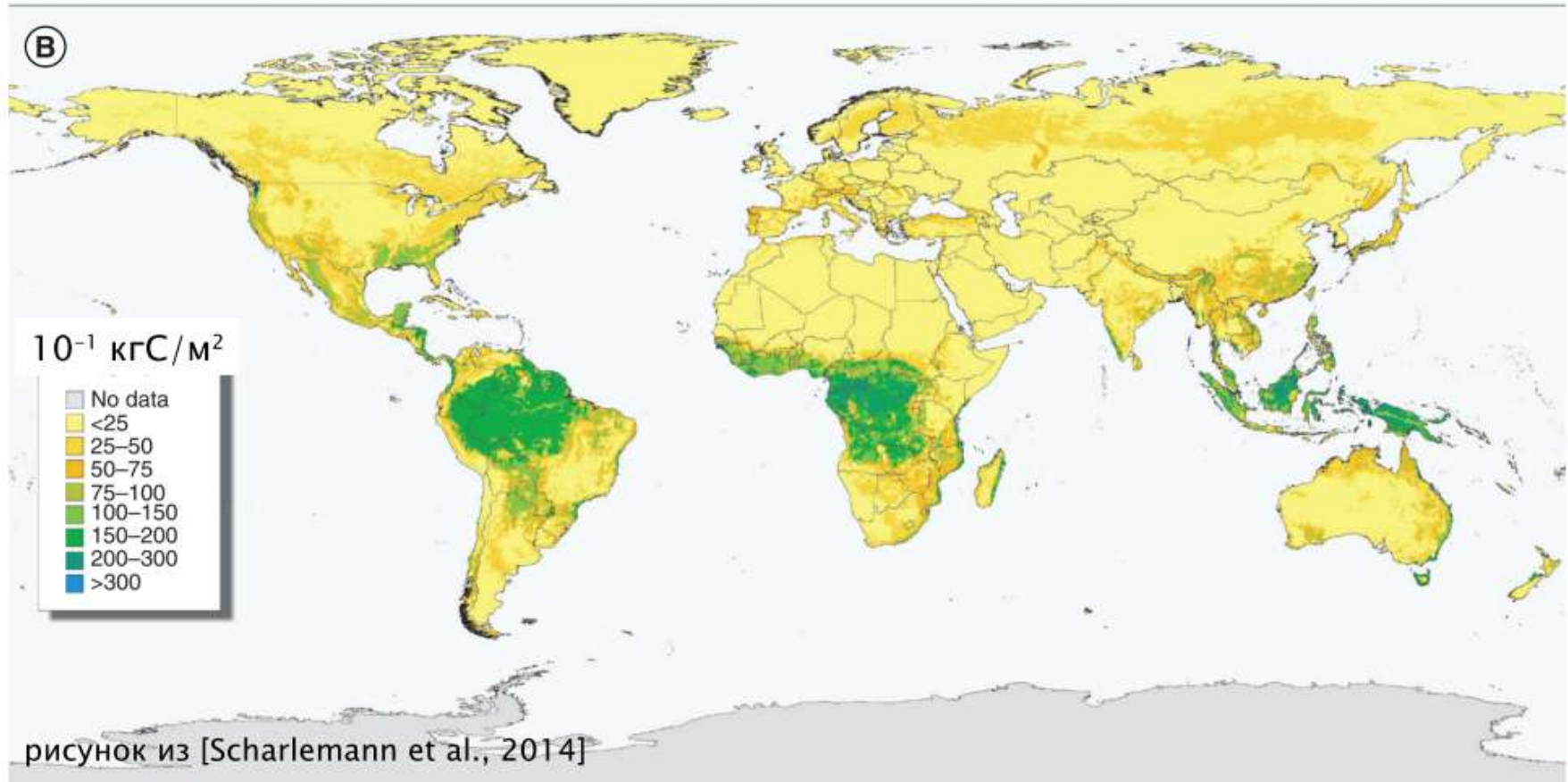
$$F_p \sim q_i / (q_i + q_{1/2})$$

$q_i \approx (1.6-4) q_{CO_2}$ - межклеточная концентрация CO₂

$q_{1/2} = 400-900 \text{ млн}^{-1}$ - постоянная полунасыщения



Запас углерода в растительности (IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map for the Year 2000)



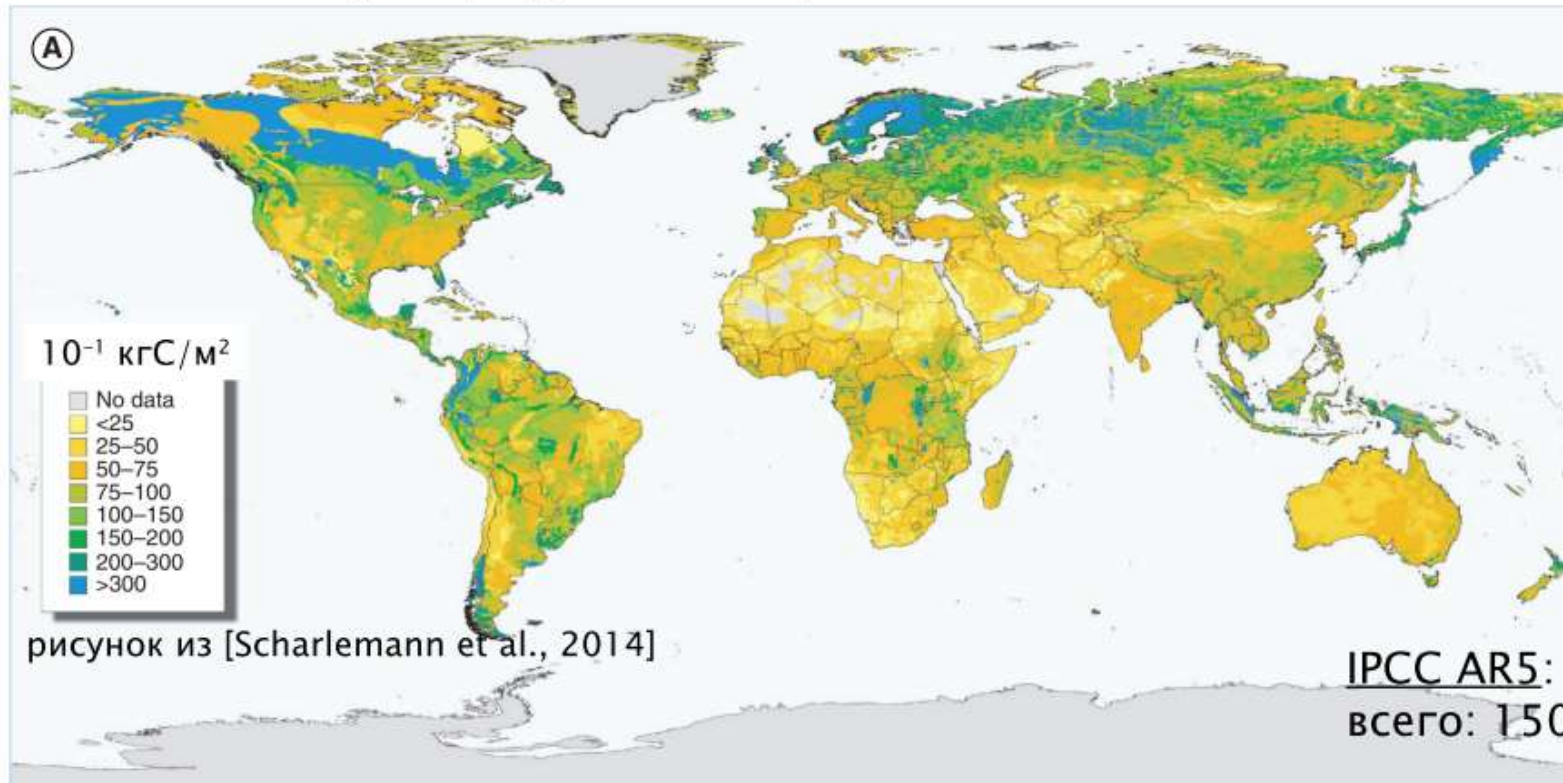
IPCC AR5:

всего: 450–650 ПгС

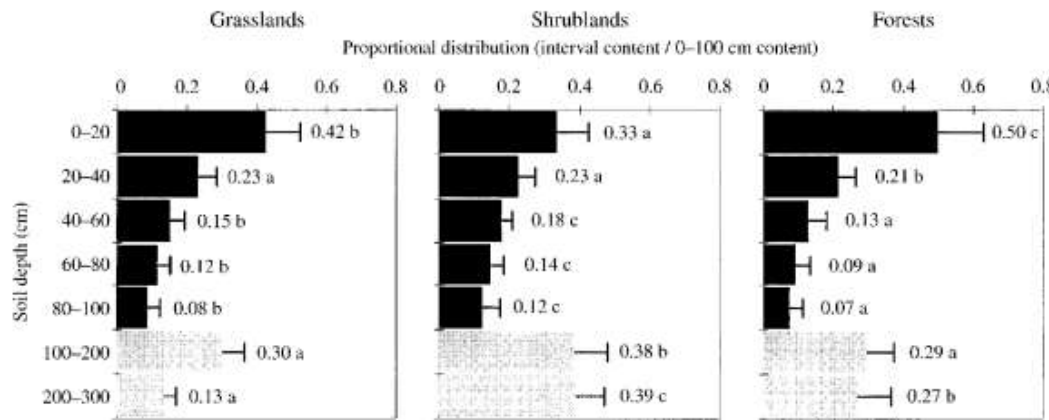
за индустриальный период: -30 ± 45 ПгС

Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

Запас углерода в почве (Harmonized World Soil Database)



запас углерода слоя почвы относительно запаса слоя 0–100 см [Jobbágy, Jackson, 2000]

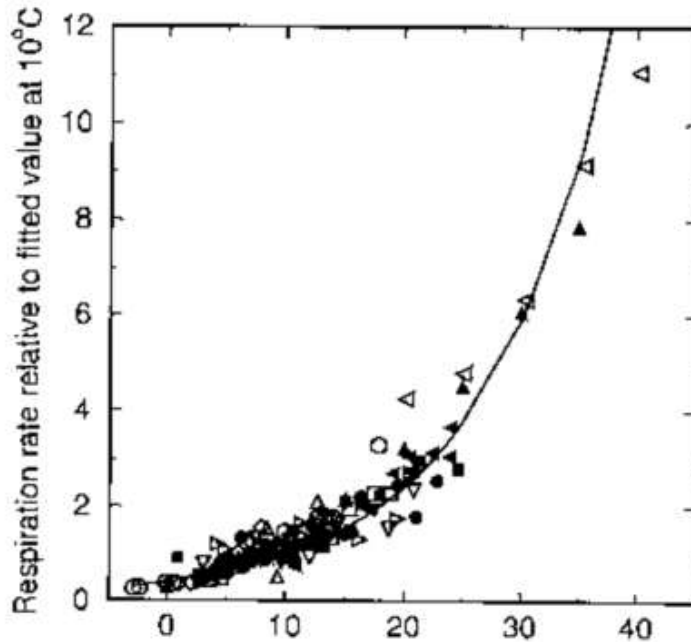


0–100 см: 1502 ПгС
0–300 см: 2442 ПгС

Гетеротрофное дыхание

$$F_s = F_s(T, w, \text{химический состав})$$

температура T [Lloyd-Taylor, 1994]

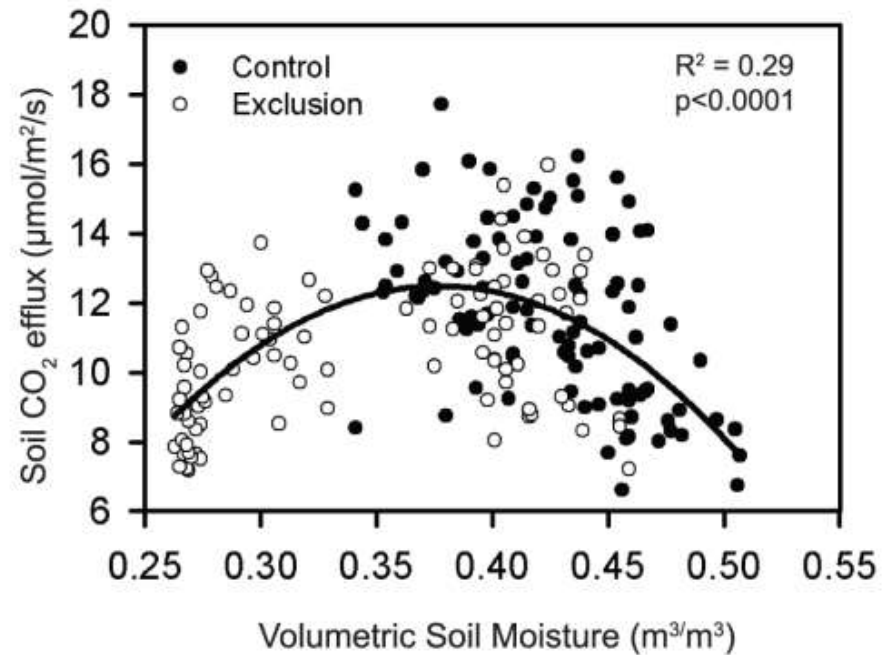


$$F_s \sim Q_{10}^{(T-T_0)/\Delta T}$$

$$\Delta T = 10^\circ\text{C}$$

$$Q_{10} \approx 2$$

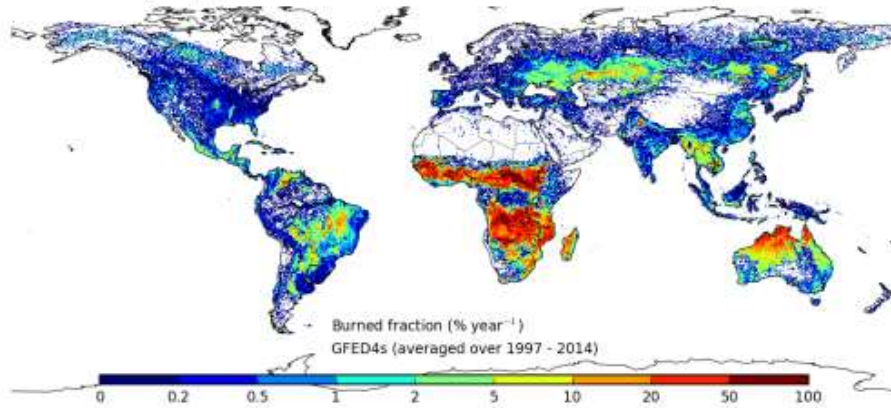
влажностное содержание w
[Wood et al., 2013]



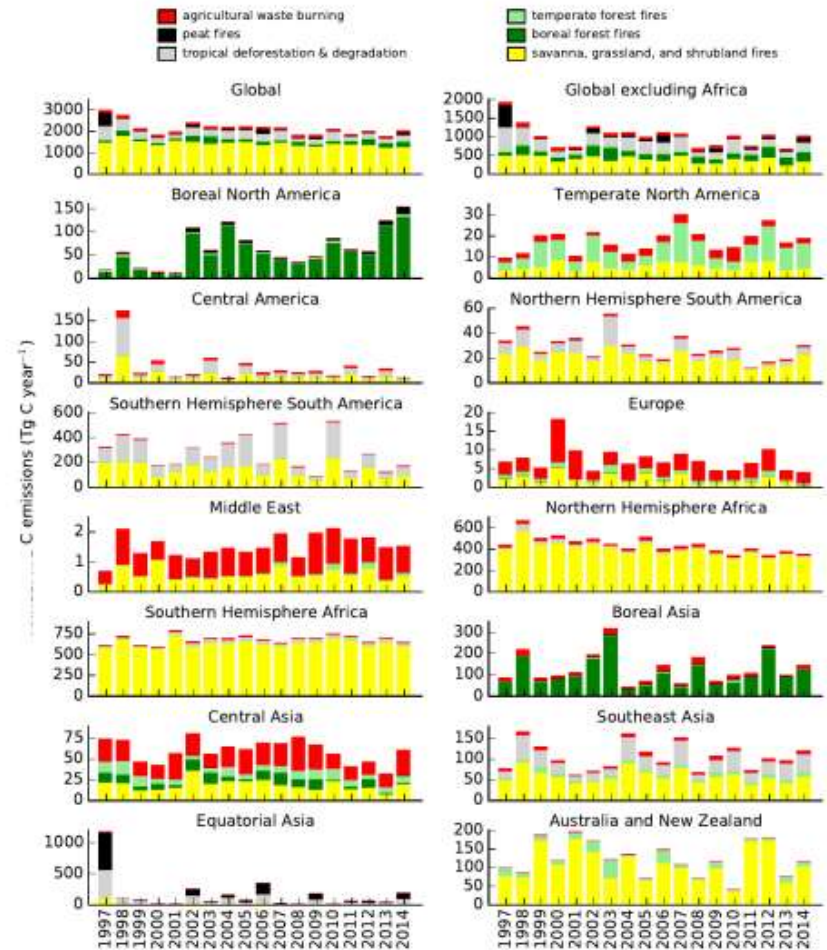
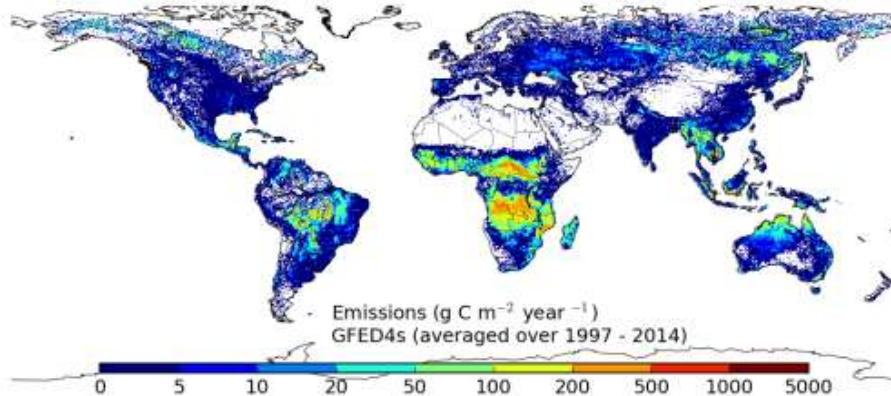
Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

Природные пожары, GFED-4.1s data, 1997-2014 гг.

годовая площадь выгорания
(% ячейки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),
среднее 3.5 ± 0.2 млн km^2 / г.



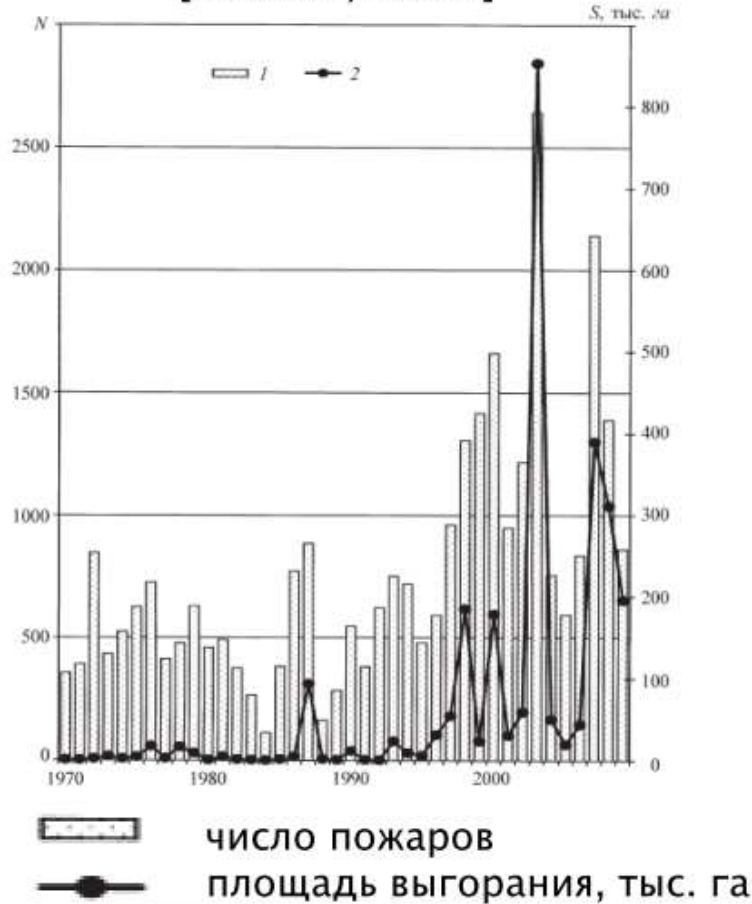
эмиссии CO_2 [$\text{gC m}^{-2} \text{год}^{-1}$]
(модель CASA-TEM),
среднее 2.0 ± 0.3 ПгС/г.,
только природные пожары: 1.4 ± 0.3 ПгС/г.



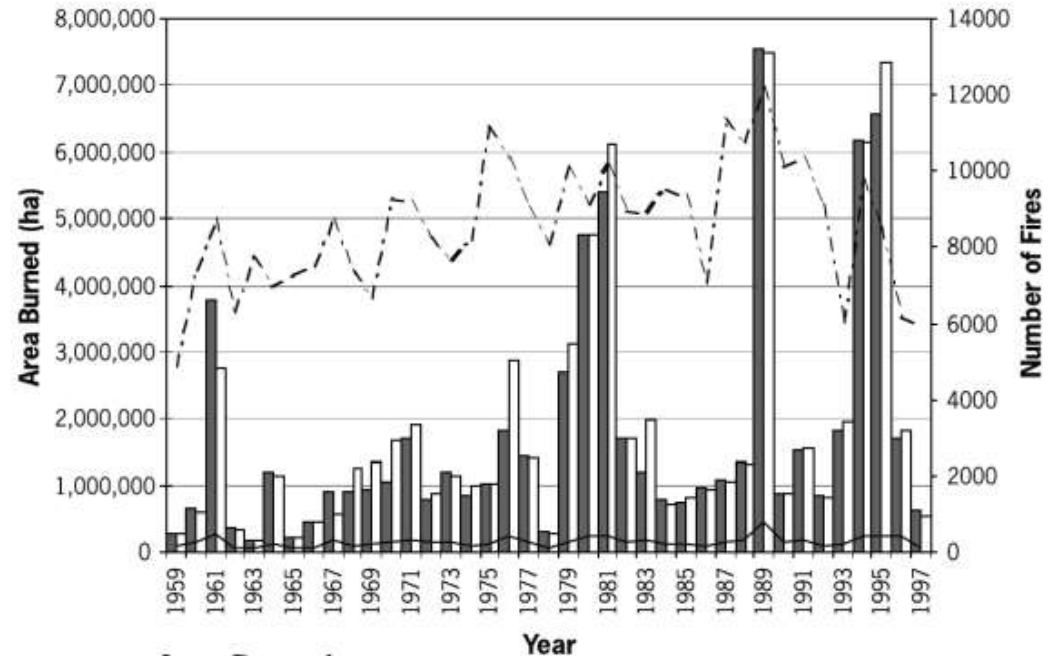
Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

Усиление активности природных пожаров в последние десятилетия

Забайкальский край,
Авиалесоохрана
[Обязов, 2012]



Канада [Stocks et al., 2003]



Area Burned

■ National Statistics
□ LFDB

Number of Fires

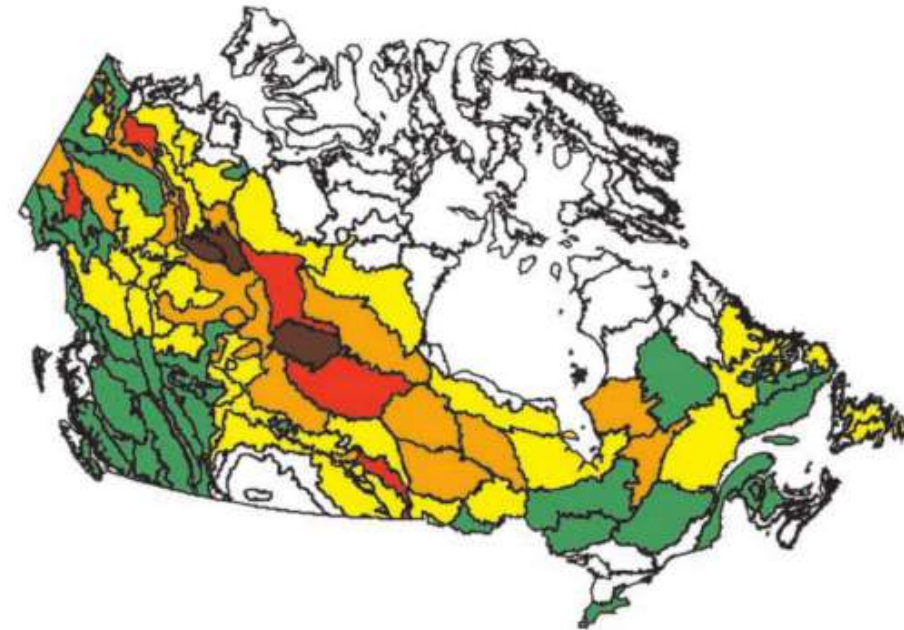
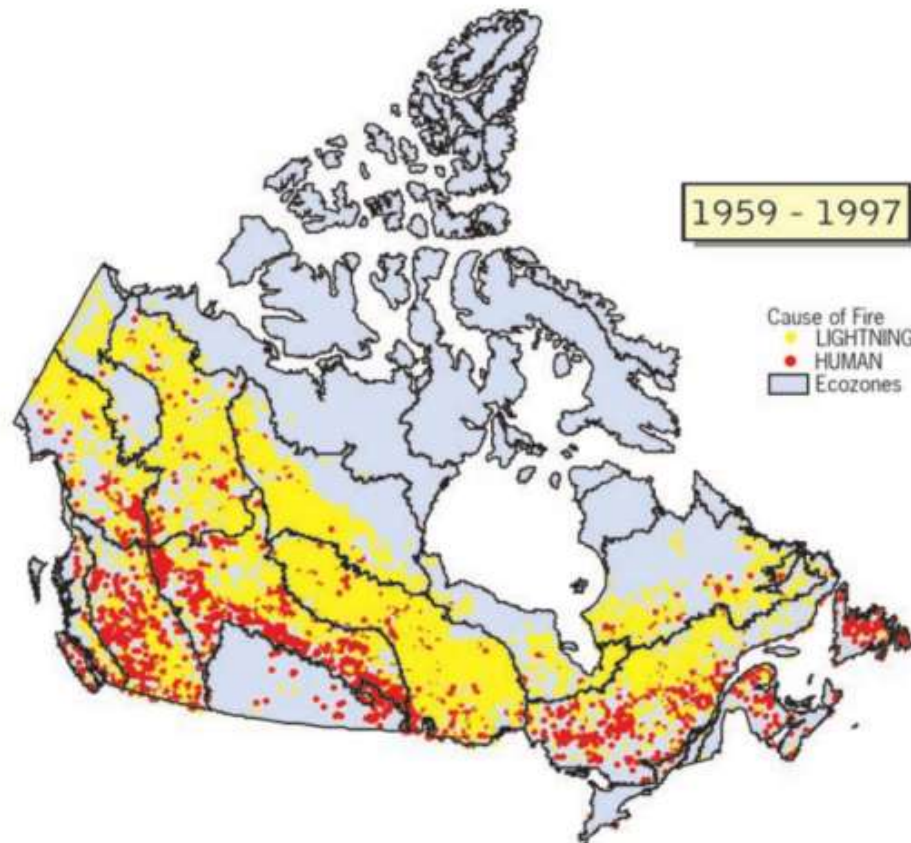
--- National Statistics
— LFDB



Источники возгорания для природных пожаров (Канада, LFDB [Stocks et al., 2003])

источники возгорания

площадь выгорания

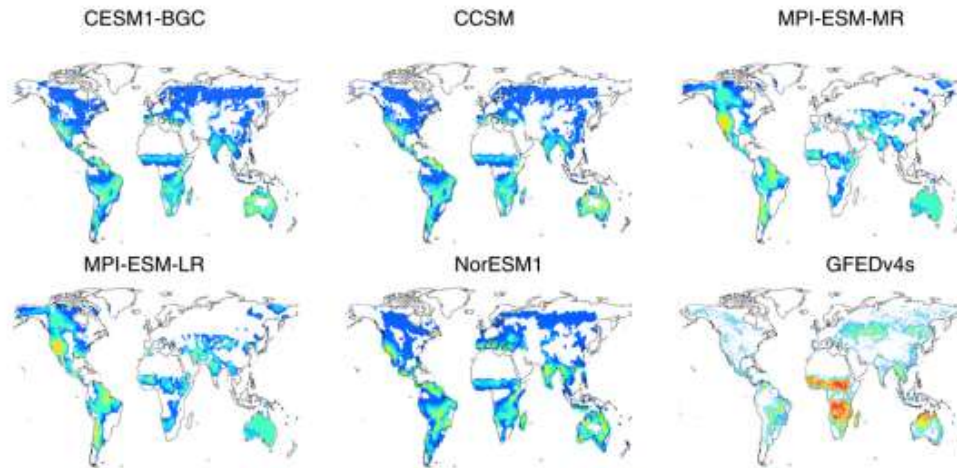


Замечание. При потеплении климата число молниевых ударов возрастает

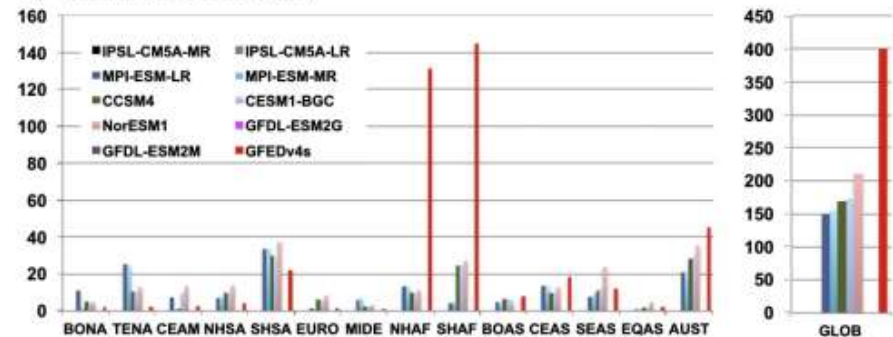
Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

Природные пожары (CMIP5) [Kloster, Lasslop, 2017]: 1981–2005 гг.

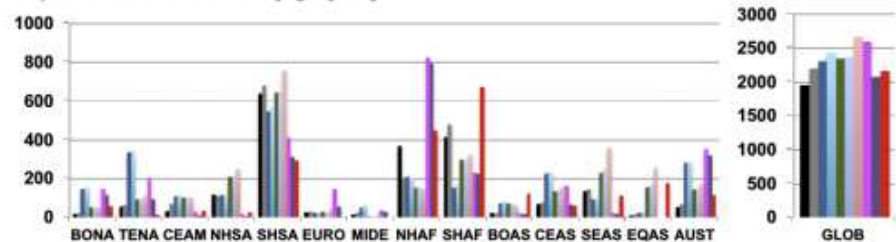
площадь выгорания [%/год]



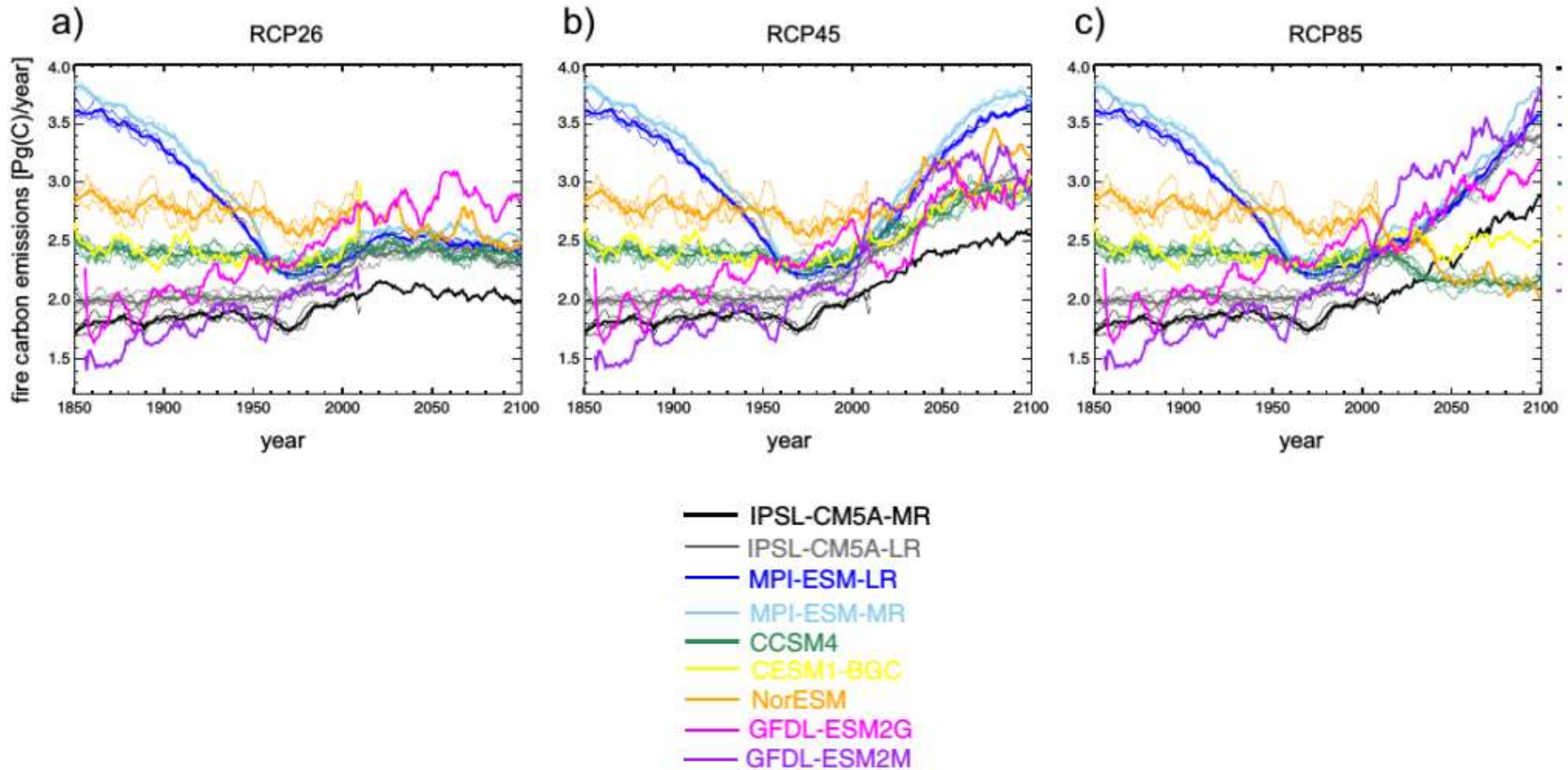
a) annual burned area [Mha]



b) fire carbon emissions [TgC/year]

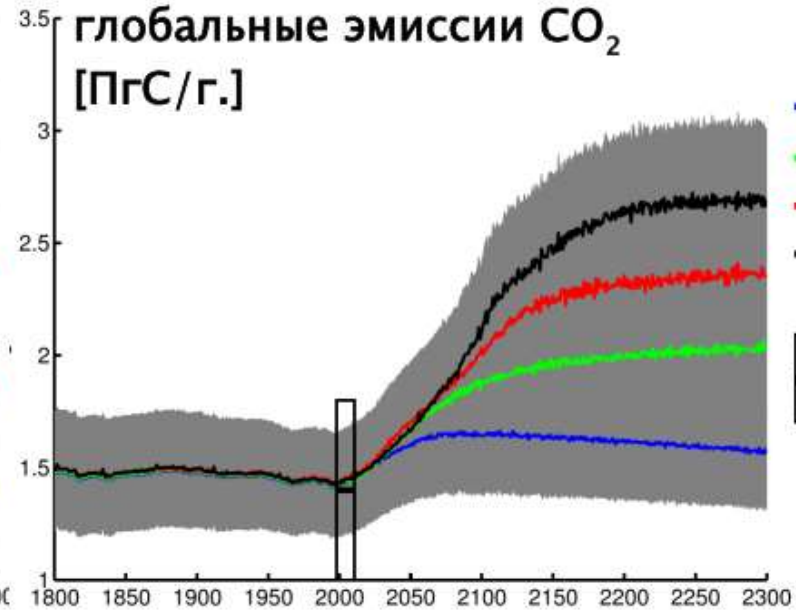
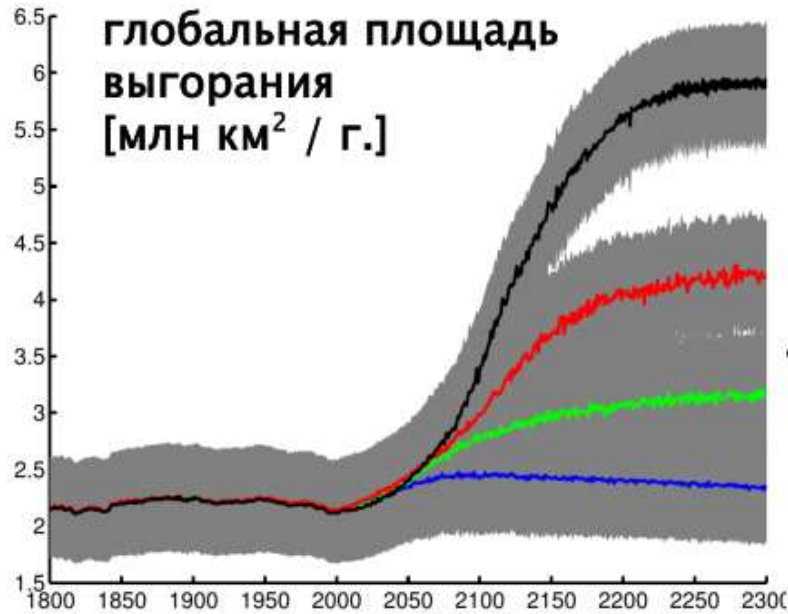


Природные пожары (CMIP5) [Kloster, Lasslop, 2017]: XX–XXI века



Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

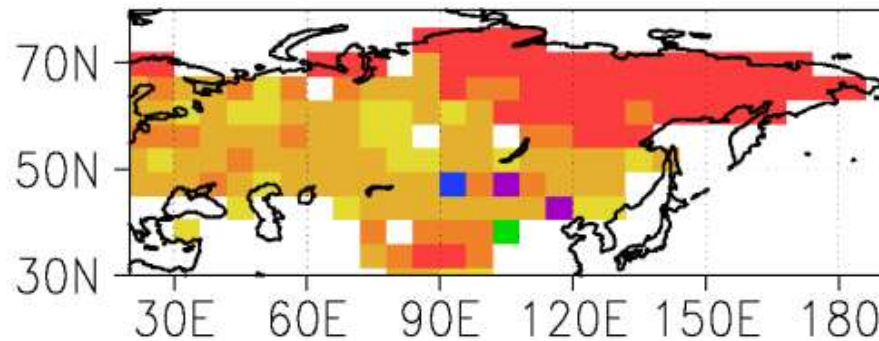
Природные пожары (КМ ИФА РАН) [Eliseev et al., 2014]



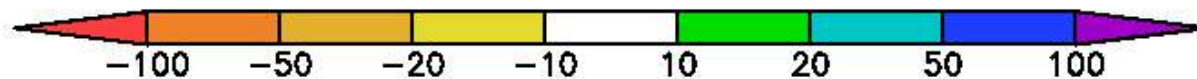
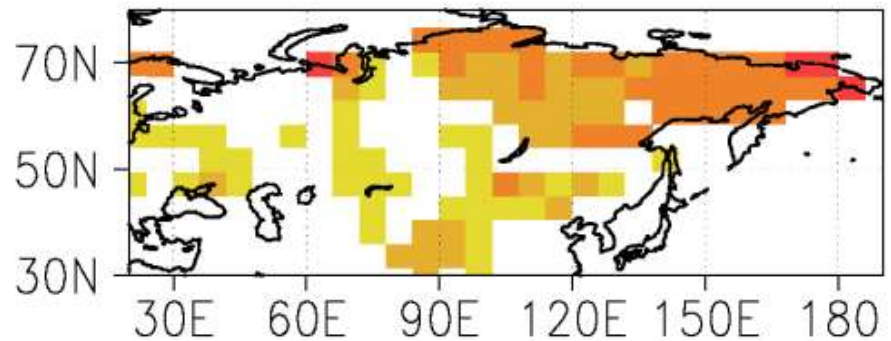
- RCP 2.6
- RCP 4.5
- RCP 6.0
- RCP 8.5
- GFED-3.1 (mean and uncertainty)

изменение частоты повторяемости пожаров [лет], RCP 6.0

от 1997–2011 гг. к 2091–2100 гг.

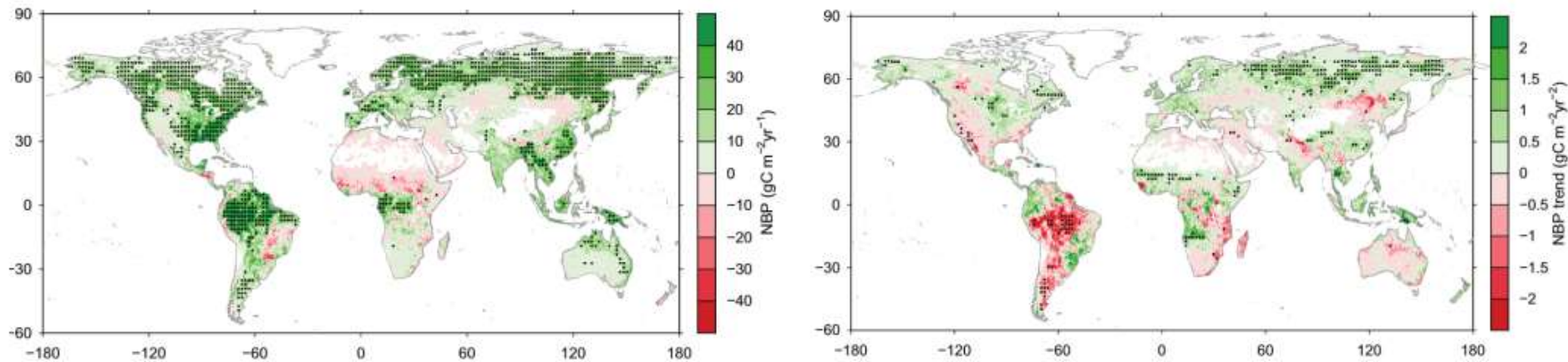


от 2091–2100 гг. к 2291–2300 гг.



Поток CO₂ между атмосферой и наземными экосистемами

$NBP = F_p - F_v - F_s = F_l - F_f$: проект ISIMIP2a, 1971–2010 гг. [Chang et al., 2017]



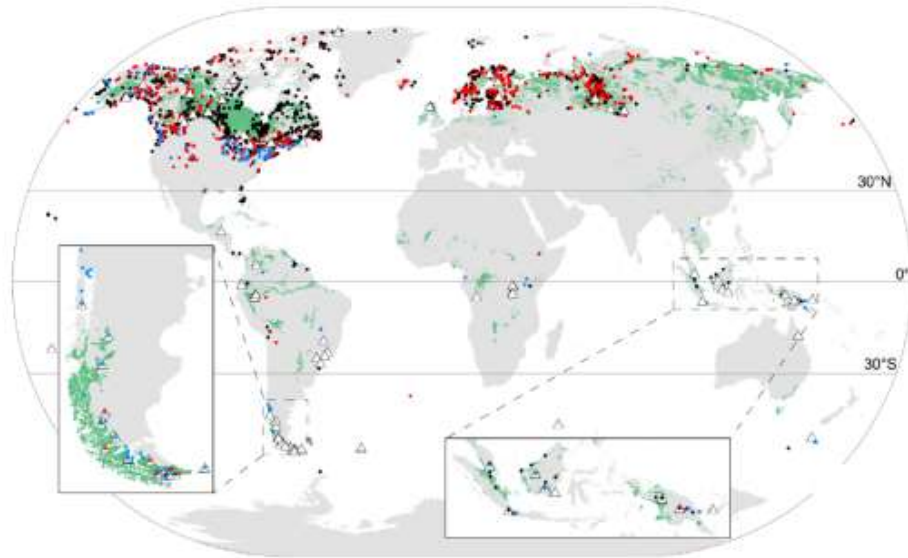
Поглощение CO₂ наземными экосистемами [Le Quere et al., 2013]

	mean (PgC yr ⁻¹)					
	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2002–2011
Residual terrestrial sink (S _{LAND})	1.7 ± 0.7	1.7 ± 0.8	1.6 ± 0.8	2.7 ± 0.8	2.4 ± 0.8	2.6 ± 0.8

В 1750–2011 гг. наземные экосистемы поглотили 160 ± 90 ПгС [IPCC, 2013]

Накопление торфа в голоцене [Yue et al., 2010]

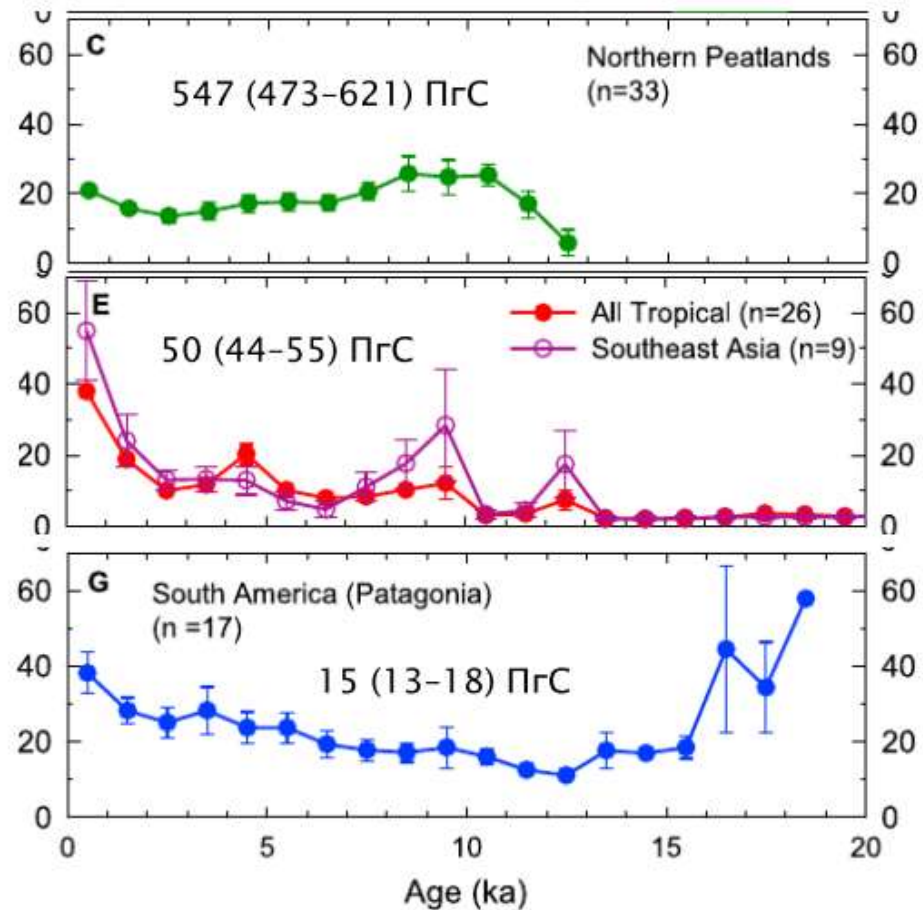
возраст торфа у основания



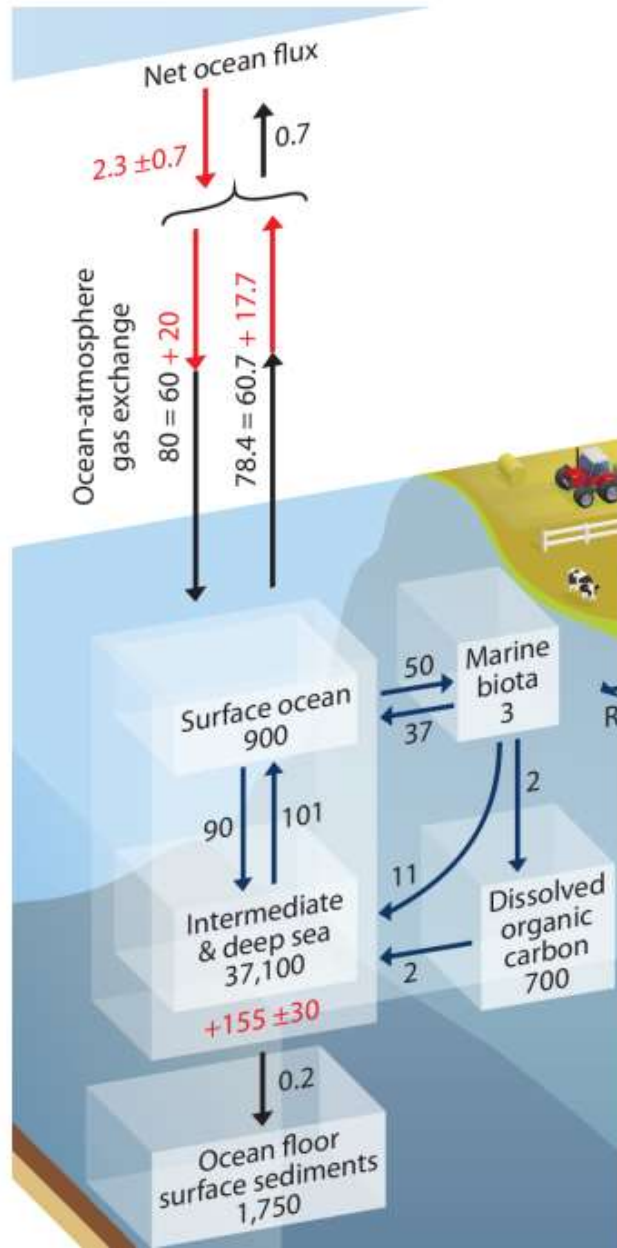
Basal age (ka)

- < 8
- 8 - 12
- > 12

накопление торфа [$\text{гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$]



Общие свойства океанического углеродного цикла



- **Неорганическая ветвь (solubility pump):** Растворение CO_2 в морской воде и перенос океанической циркуляцией
- **Органическая ветвь (biological pump):** Поглощение растворенного в воде CO_2 экосистемами океана. В настоящее время вклад мал, т.к. время нахождения углерода в экосистемах океана составляет порядка недели, но возможно увеличение вклада в будущем.

Поглощение CO_2 океаном (1)

Поток CO_2 на единицу площади:

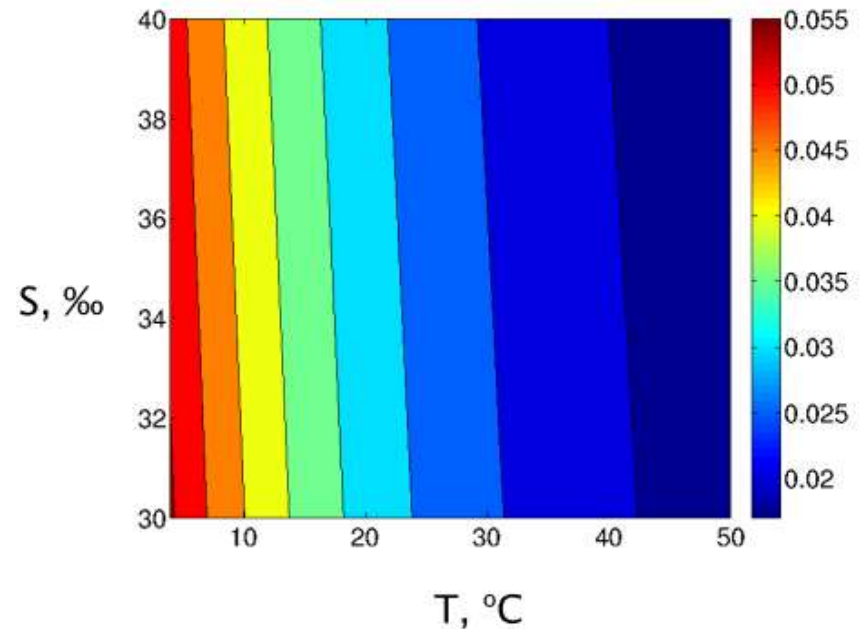
$$f_o = k_{\text{CO}_2} \alpha (p\text{CO}_{2,a} - p\text{CO}_{2,o})$$

- k – коэффициент газообмена (зависит от скорости ветра),
- α – растворимость CO_2 в морской воде ($\approx 1.45 \text{ кгCO}_2/\text{м}^3$),
- $p\text{CO}_{2,\{a,o\}}$ – парциальное давление CO_2

$$F_o \approx 2 \text{ ПгС/год} \Leftrightarrow$$

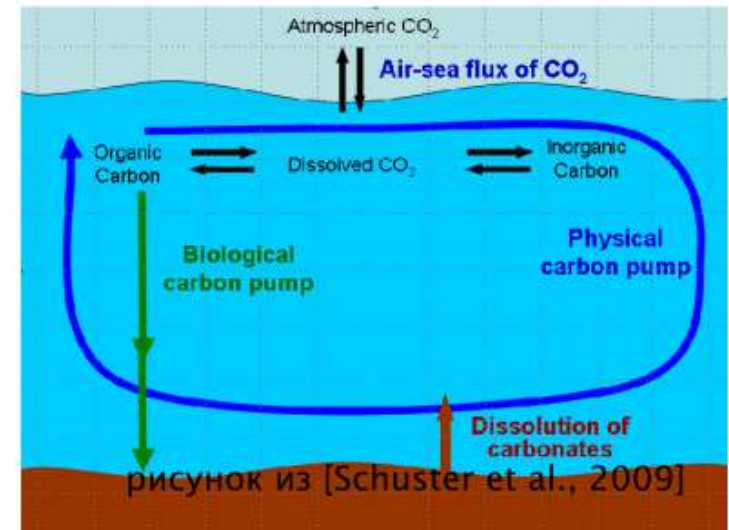
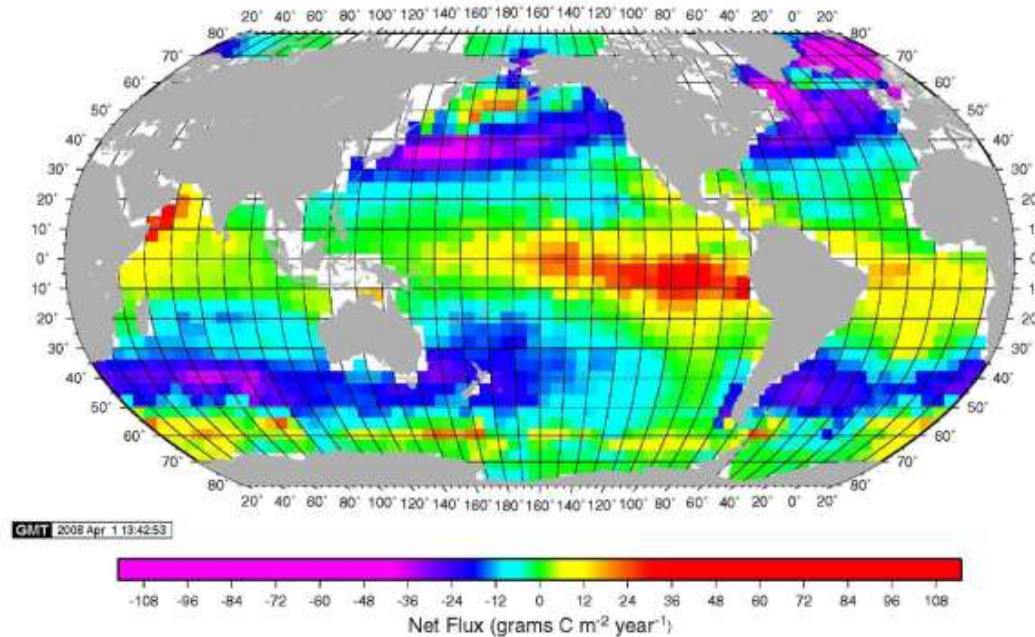
$$(p\text{CO}_{2,a} - p\text{CO}_{2,o}) = 6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}.$$

Растворимость CO_2 в морской воде
[моль $\text{кг}^{-1} \text{ атм}^{-1}$]
(формула [Weiss, 1974])



Поглощение CO₂ океаном (2)

Среднегодовой поток CO₂ от океана к атмосфере, 2000–е гг. [Takahashi et al, 2009]

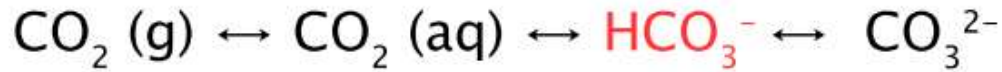


Поглощение CO₂ океаном [Le Quere et al., 2014]

	Mean (GtC yr ⁻¹)						
	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2003–2012	2012
Ocean sink (<i>S</i> _{OCEAN}) ^b	1.2 ± 0.5	1.5 ± 0.5	1.9 ± 0.5	2.2 ± 0.4	2.4 ± 0.5	2.5 ± 0.5	2.9 ± 0.5

В 1750–2011 гг. океан поглотил 155 ± 30 ПгС [IPCC, 2013]

Карбонатный цикл океана



приводит к тому, что

$$\Delta \text{TCO}_2 \gg \Delta [\text{CO}_2 (\text{aq})]$$

$$(\Delta \text{TCO}_2 = [\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}])$$

дифференциальный буферный фактор

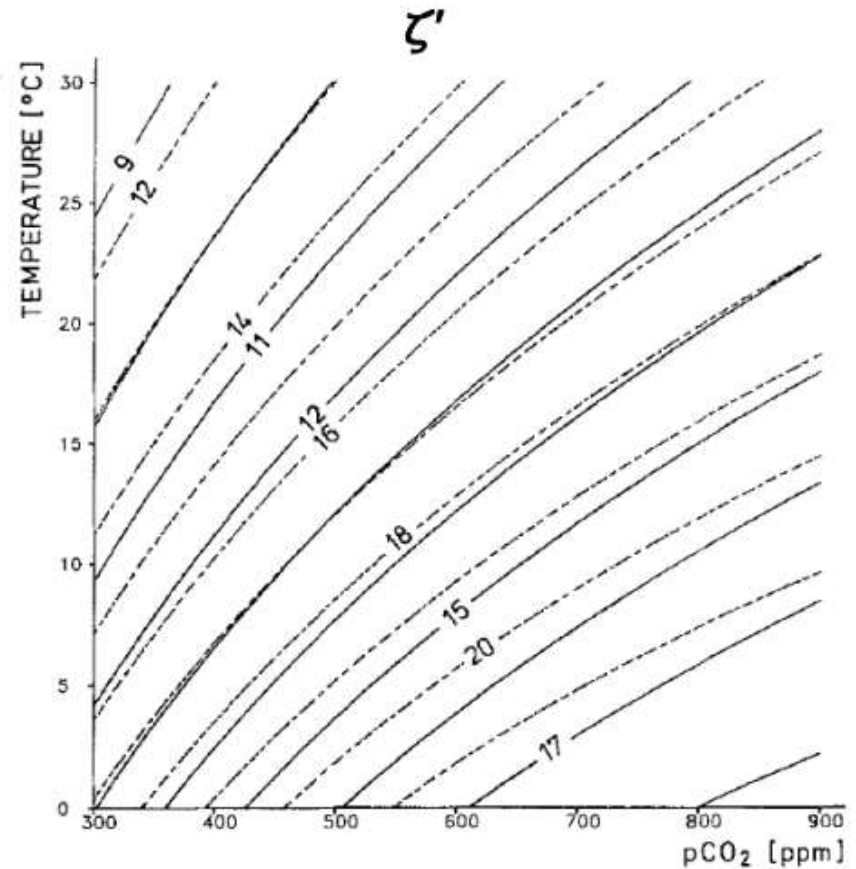
$$\zeta' = \frac{C}{s} \left(\frac{dC}{ds} \right)^{-1}$$

$$(C = \text{TCO}_2,$$

$$s = [\text{CO}_2 (\text{aq})])$$

Справедливо

$$\zeta' > 1.$$

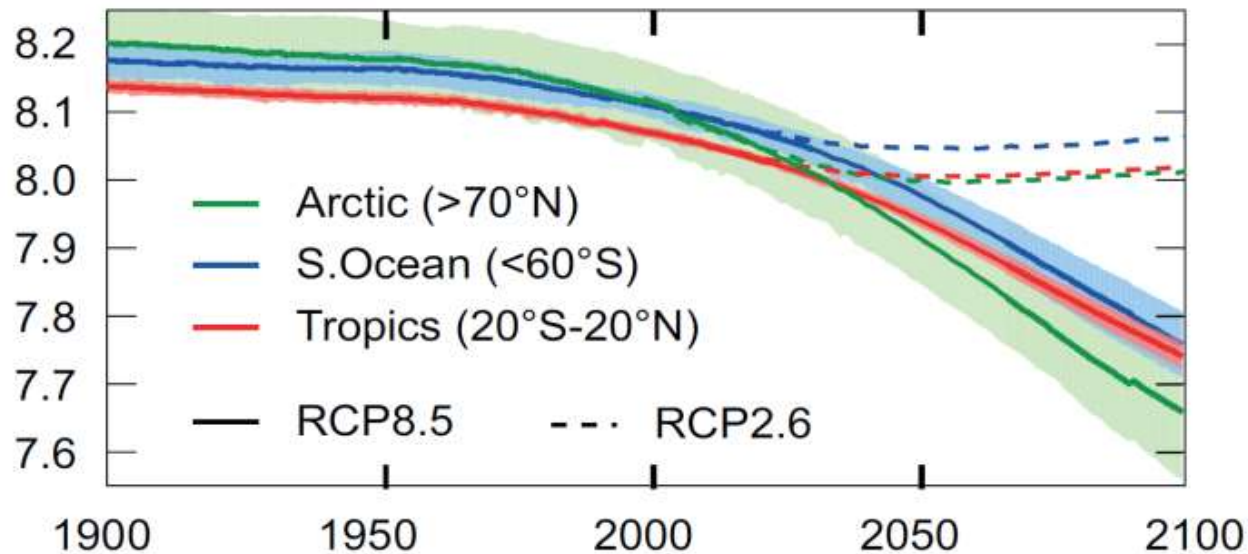


сплошные линии – полная система
пунктир – без учёта влияния боратов
[Maier-Reimer, Hasselmann, 1987]

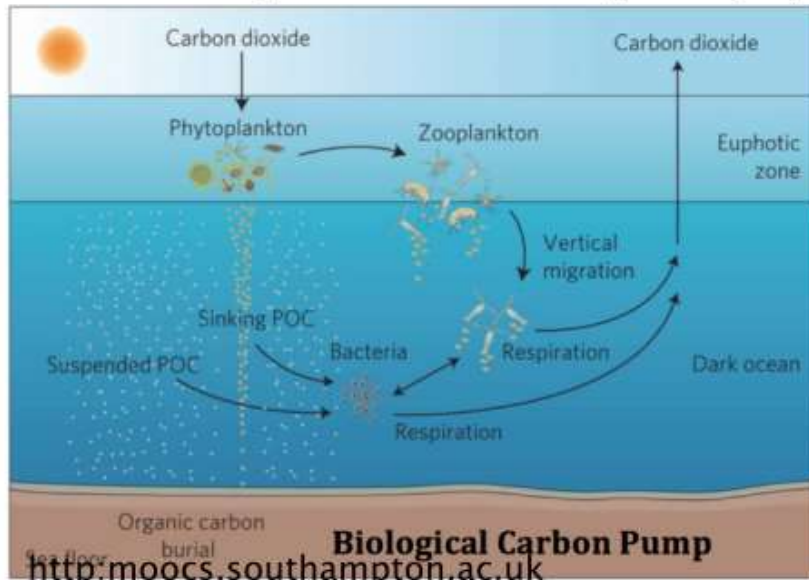
Растворение карбоната кальция

Поглощение CO_2 океаном увеличивает $\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$ (в настоящее время у поверхности $\text{pH} = 8.1 \pm 0.1$). Такое закисление океана способствует растворению кальцитов/арагонитов (гибели моллюсков, кораллов и др. животных)

Изменение pH верхнего слоя океана [IPCC, 2013]



Органический углеродный цикл океана: планктон

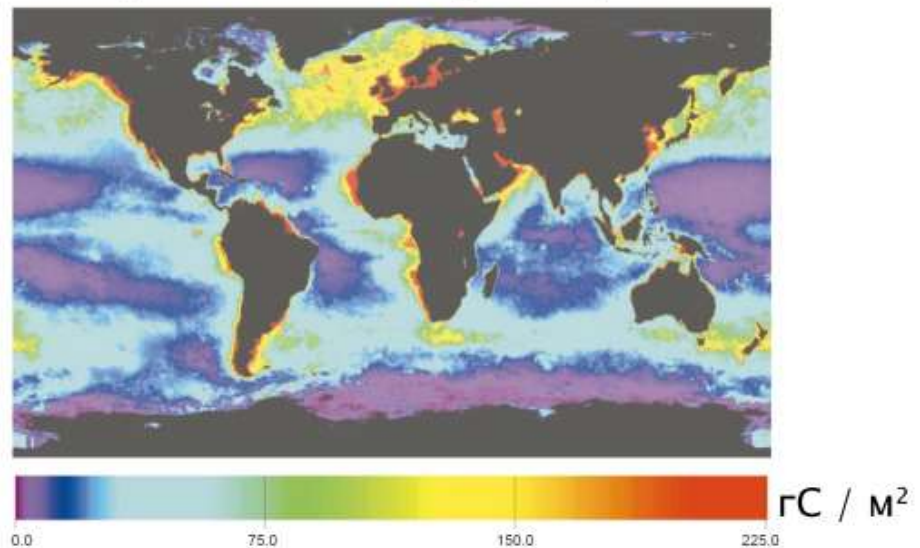
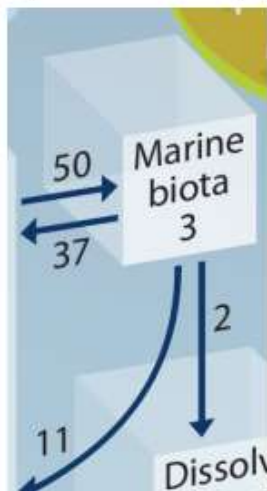


$NPP_{oc} \approx 45$ ПгС/год;

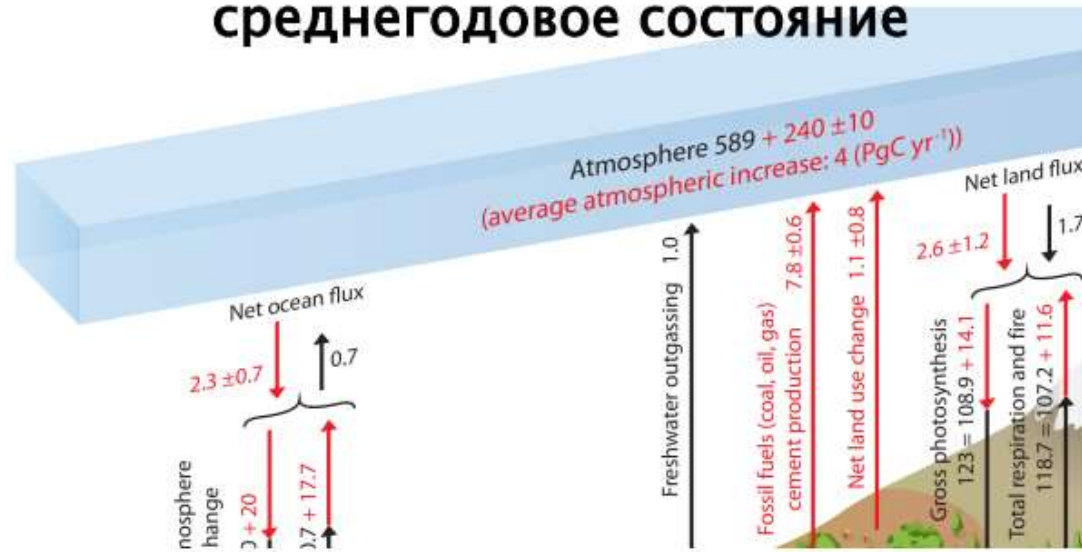
в моделях NPP_{oc} равен 44–57 ПгС/год [Carr et al., 2006].

экспорт в глубокий океан [Falkowski et al., 1998]

[IPCC AR5]



Атмосфера: современное и доиндустриальное среднегодовое состояние



Время жизни CO₂ в атмосфере ~100–140 лет

Вплоть до высот ~80 км на межгодовом и более длительном временном масштабе справедливо **приближение хорошо перемешанного газа** (постоянное отношение смеси)

$$c_0 \, dq_{\text{CO}_2} / dt = E - F_i - F_o,$$

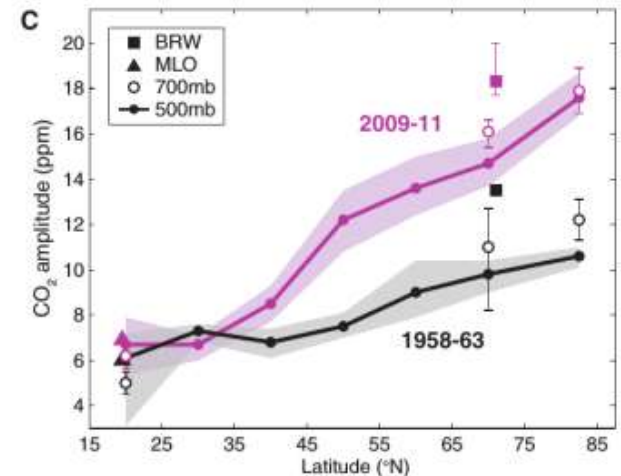
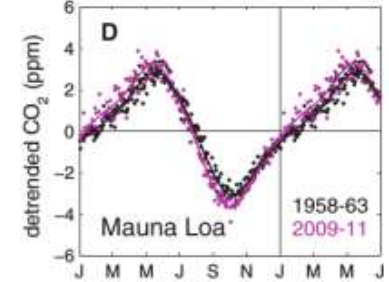
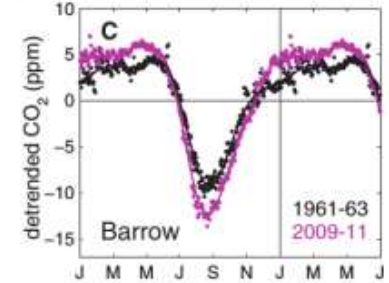
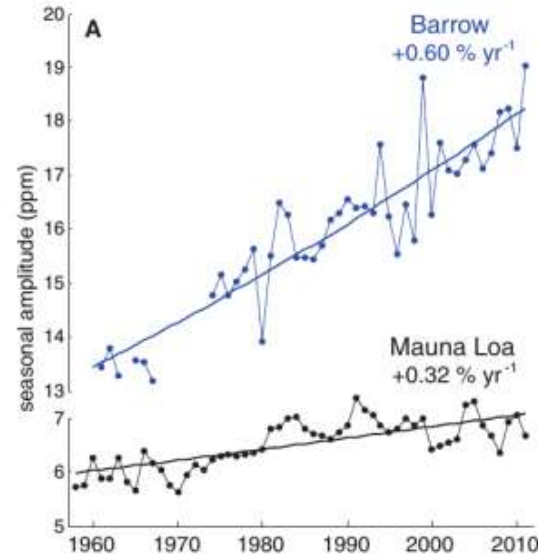
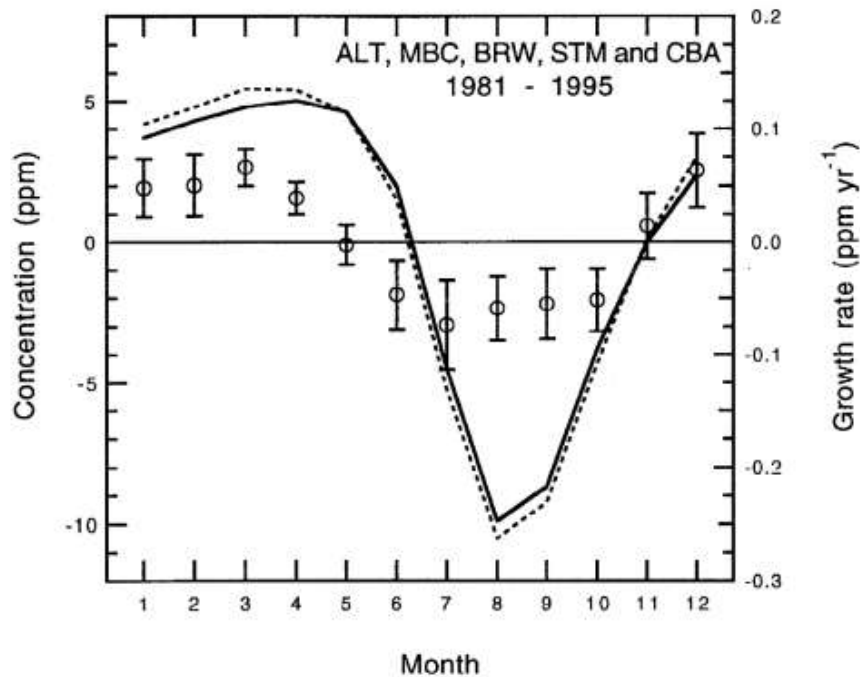
$$c_0 = 2.123 \text{ ПгС/млн}^{-1},$$

E – внешние (в том числе антропогенные) эмиссии

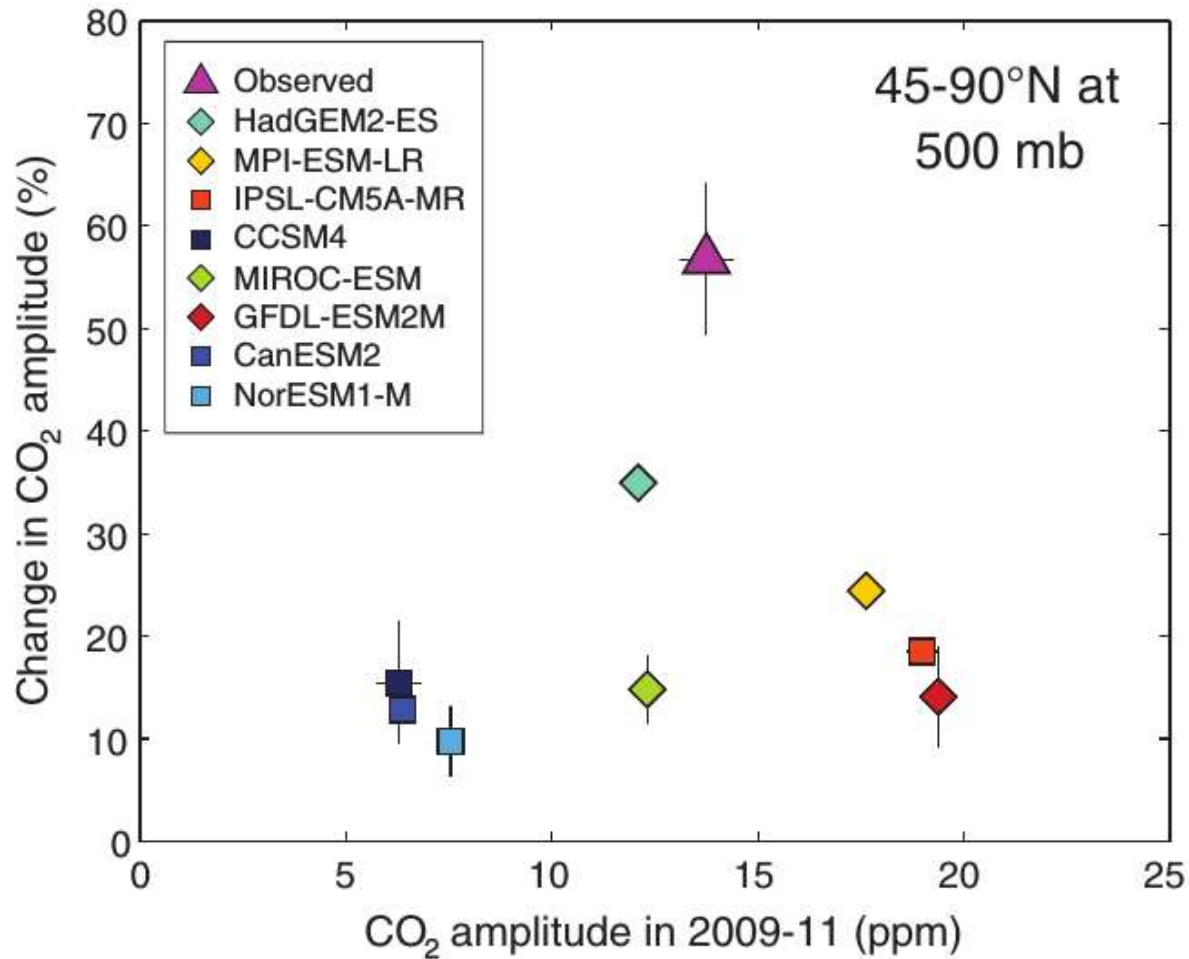
Годовой ход q_{CO_2} по наблюдениям

[Graven et al., 2013]

станции севернее 55N
[Randertson et al., 1997]

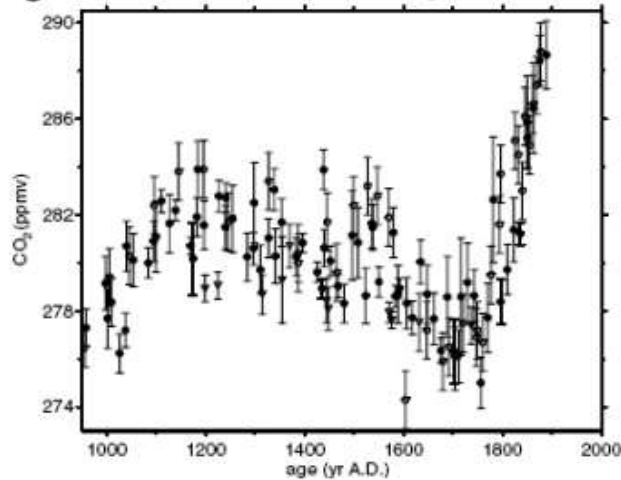


Годовой ход q_{CO_2} в моделях земной системы [Graven et al., 2013]

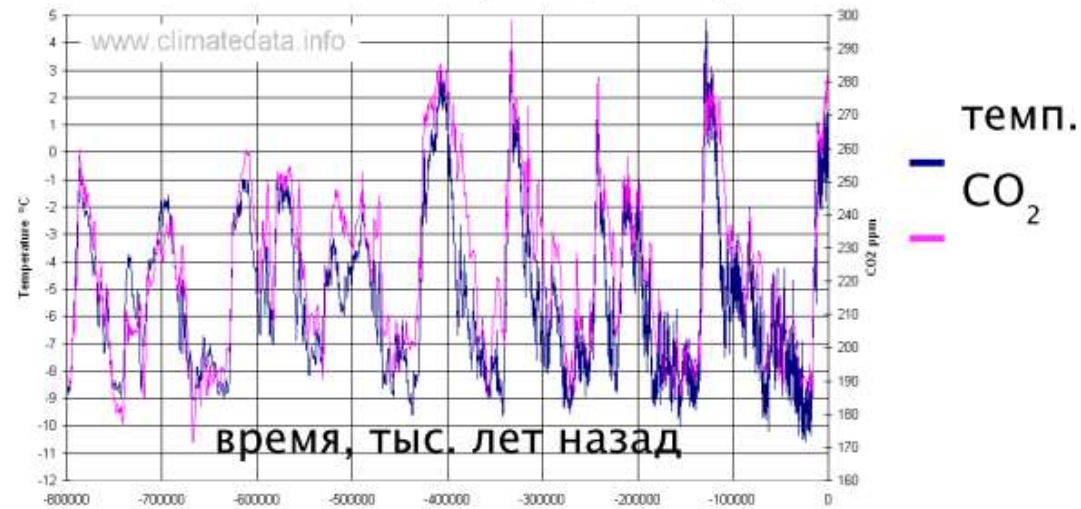


Изменение p_{CO_2} в палеоэпохи

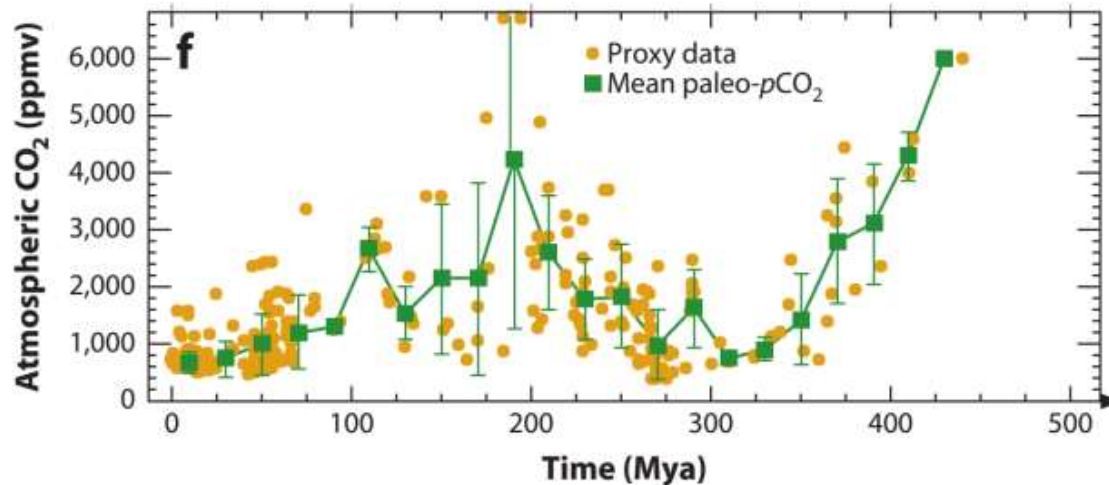
данные бурения на станциях Дроннинг Мод Лэнд и Южный полюс (обе – Антарктика) и Лоу Доум (Гренландия) [Siegenthaler et al., 2005]



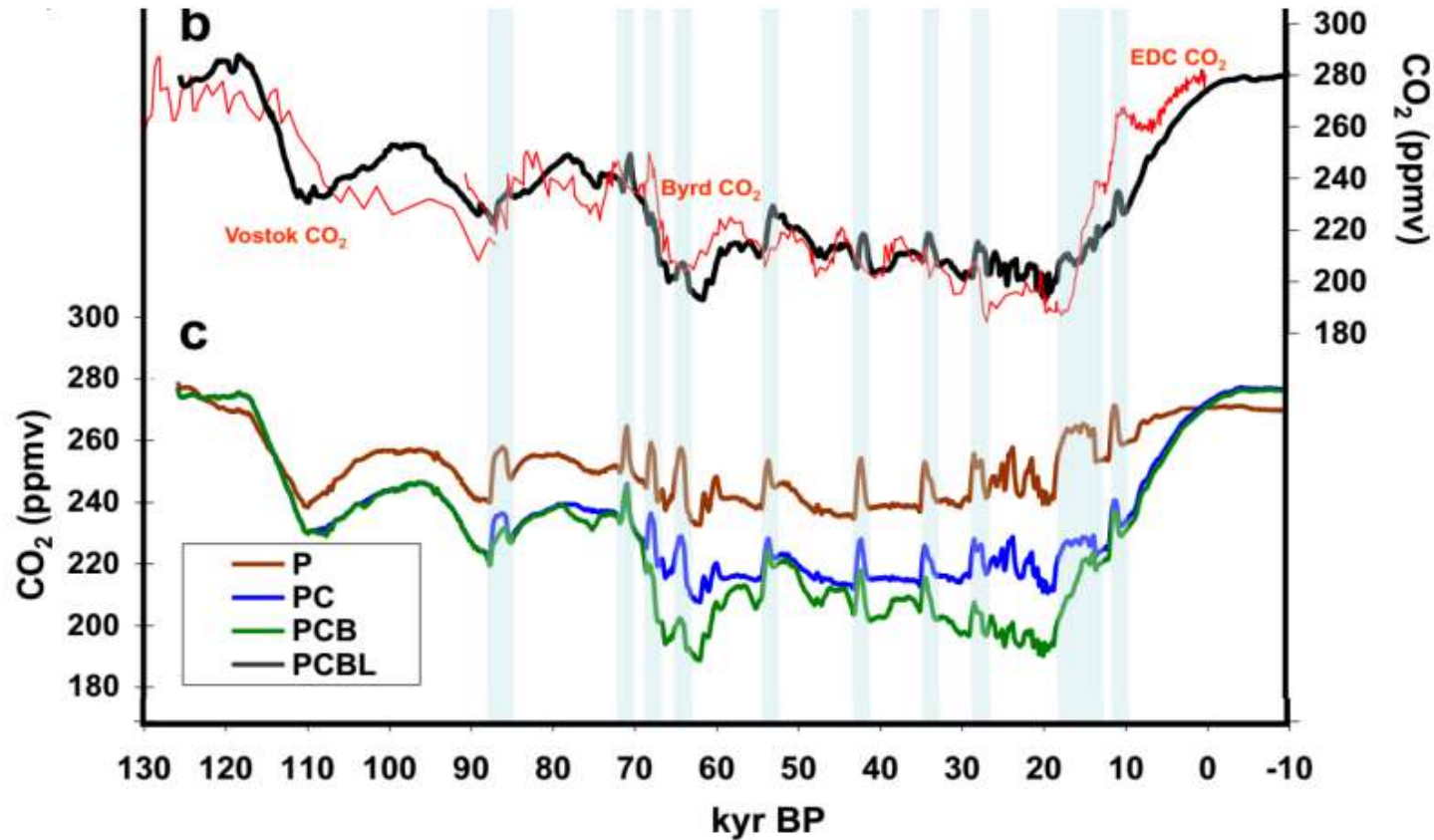
Температура и p_{CO_2} по данным бурения на станции Эпика (Антарктика)








обобщение палеорекоonstrukций [Zeebe, 2012]

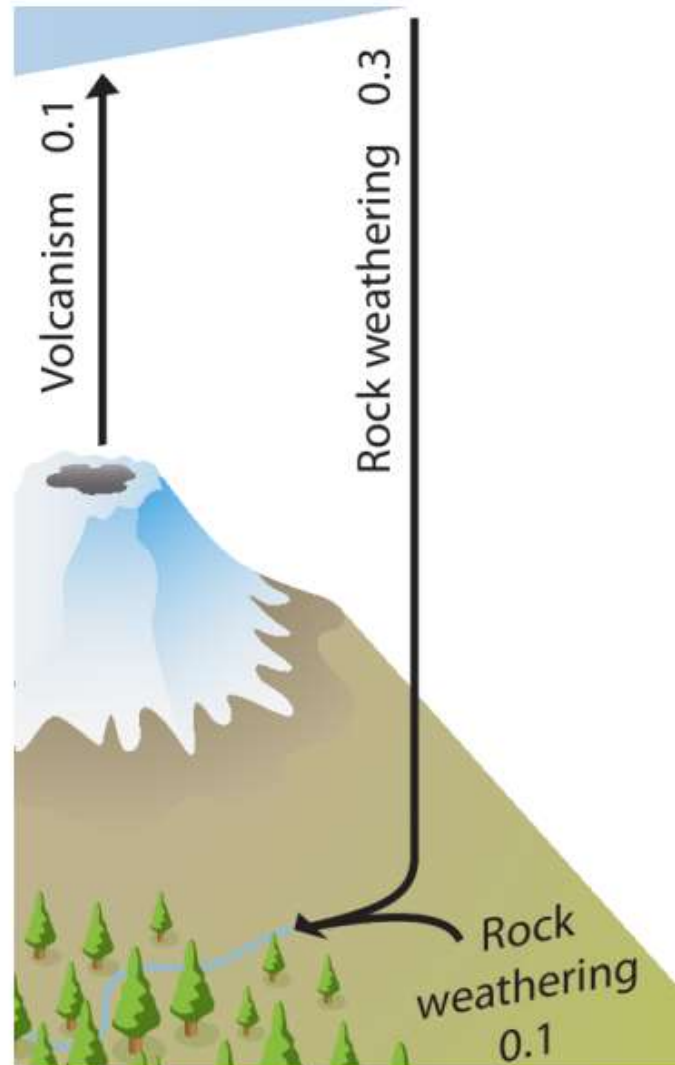


Воспроизведение q_{CO_2} для последнего ледникового цикла (Climber-2) [Brovkin et al., 2012]

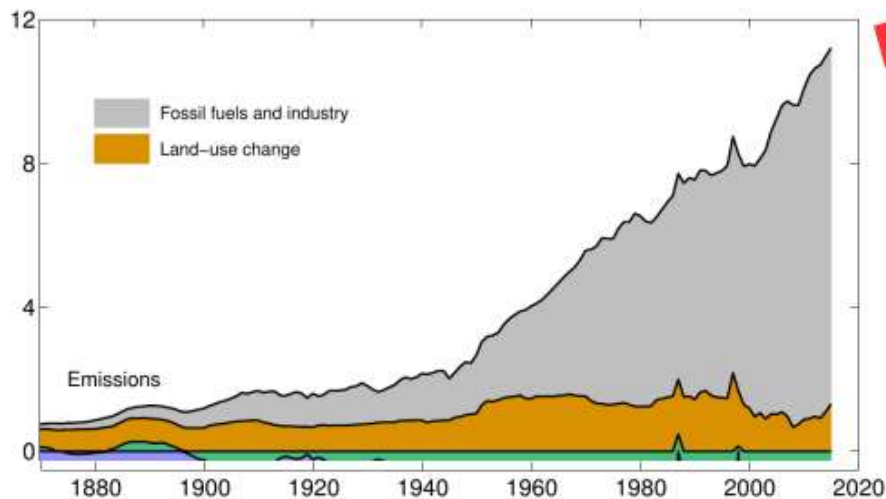
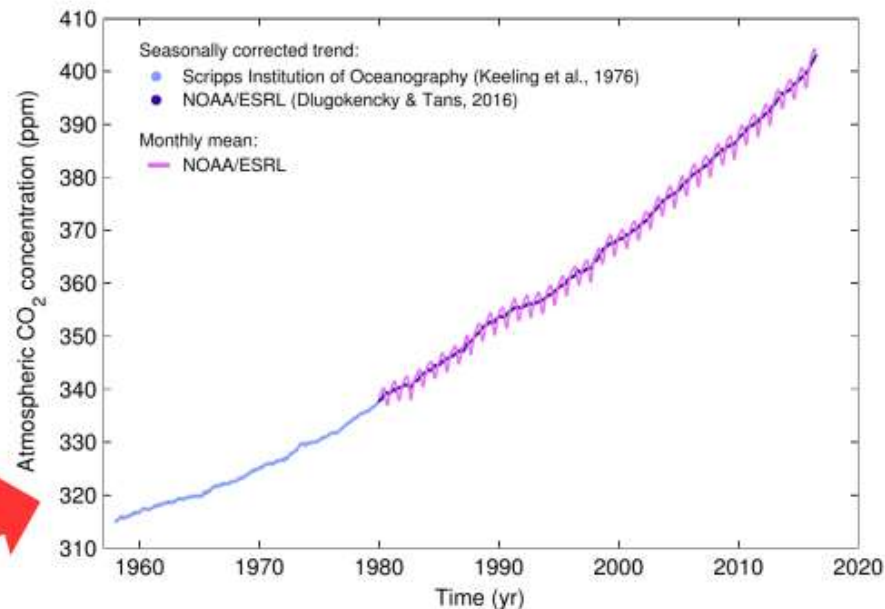
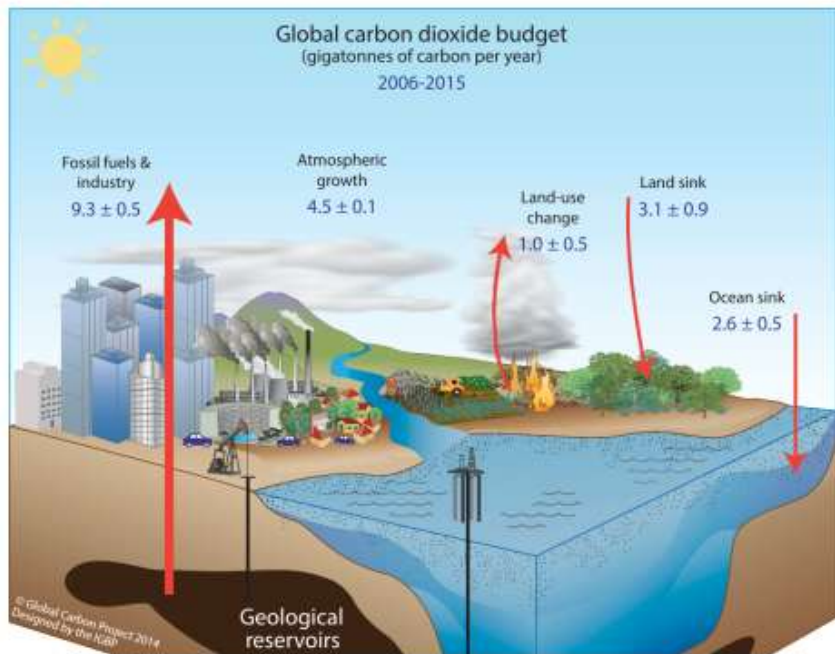


-  P: изменение температуры океана, океанической циркуляции и уровня океана
-  PC: P + неорганический УЦ океана
-  PCB: PC + органический УЦ океана
-  PCBL: PCB + наземные экосистемы
-  данные ледового бурения

Геологические источники CO₂ для атмосферы [IPCC AR5]

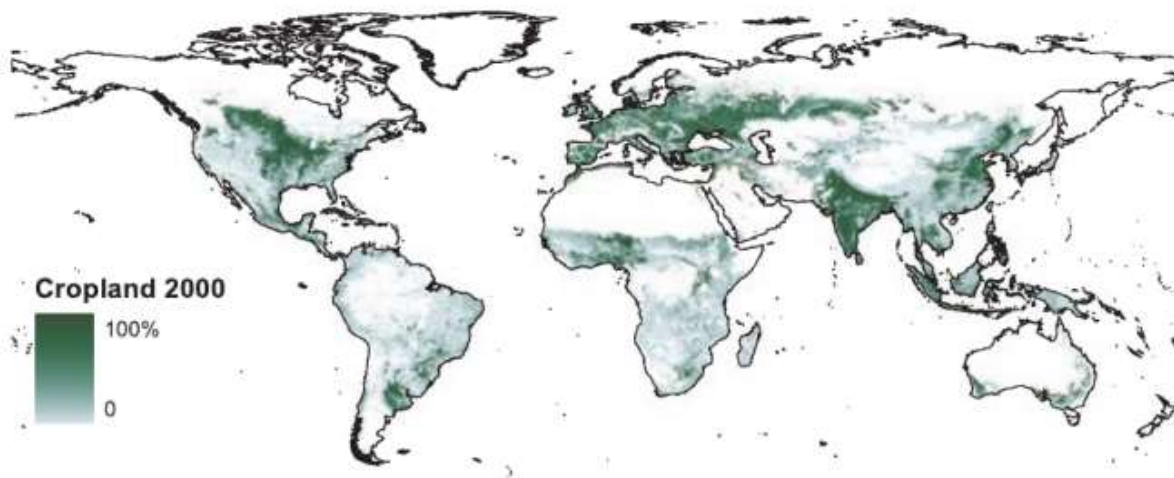


Антропогенные эмиссии CO₂ в атмосферу [Le Quéré et al., 2016]

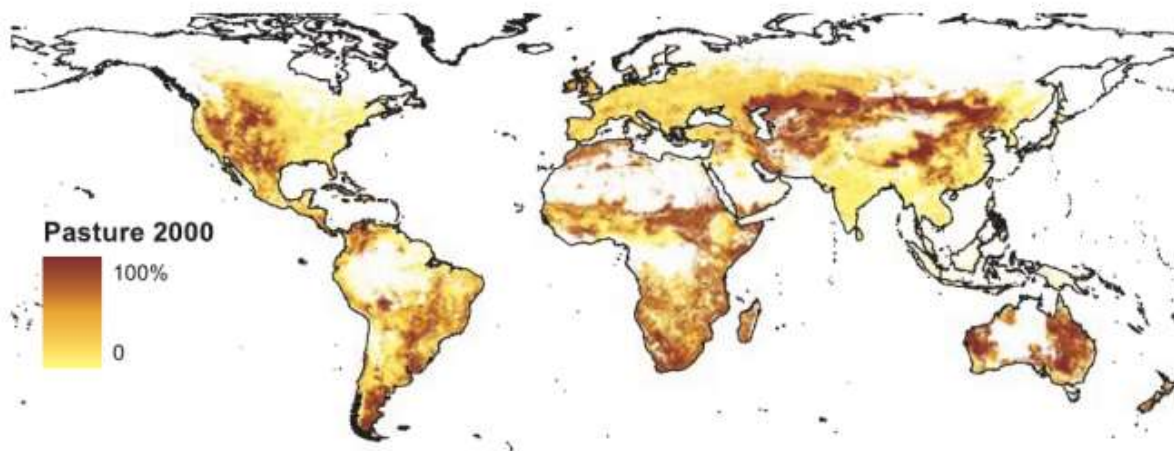


Units of GtC	1750–2015
Emissions	
Fossil fuels and industry (E_{FF})	410 ± 20
Land-use-change emissions (E_{LUC})	190 ± 65
Total emissions	600 ± 70

**Доля площади сельскохозяйственных угодий в ячейке 5' · 5',
2000 г. [Ramankutti et al., 2008]**



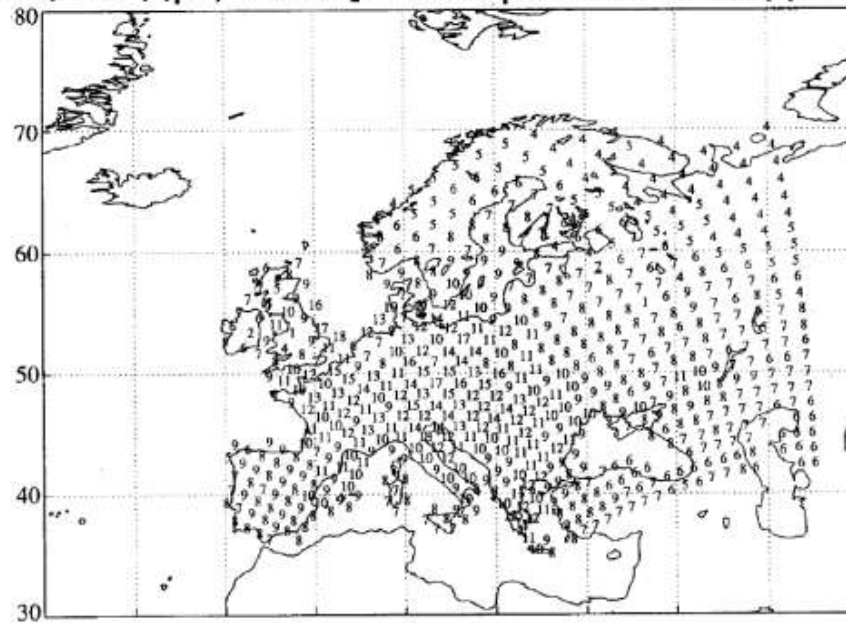
пашни:
15.0 млн км²
(12.2–17.1) млн км²,
12% площади суши,
свободной ото льда



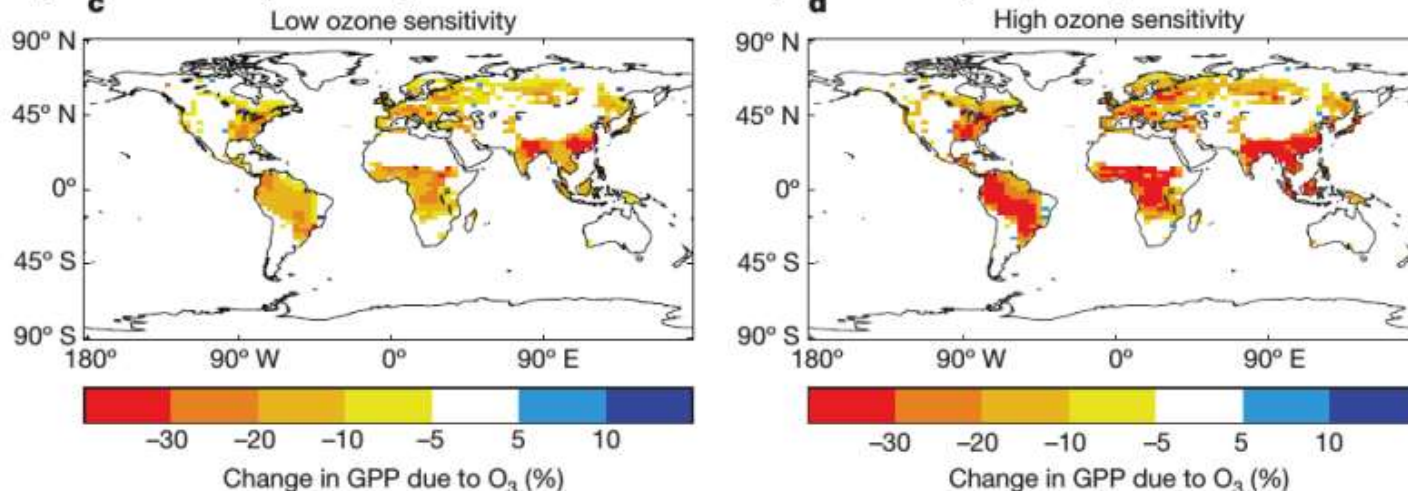
луга:
28.0 млн км²
(23.6–30.0) млн км²,
22% площади суши,
свободной ото льда

Влияние озона на интенсивность фотосинтеза

[Семенов и др., 1998]: эмпирическая модель, к 1993 г.

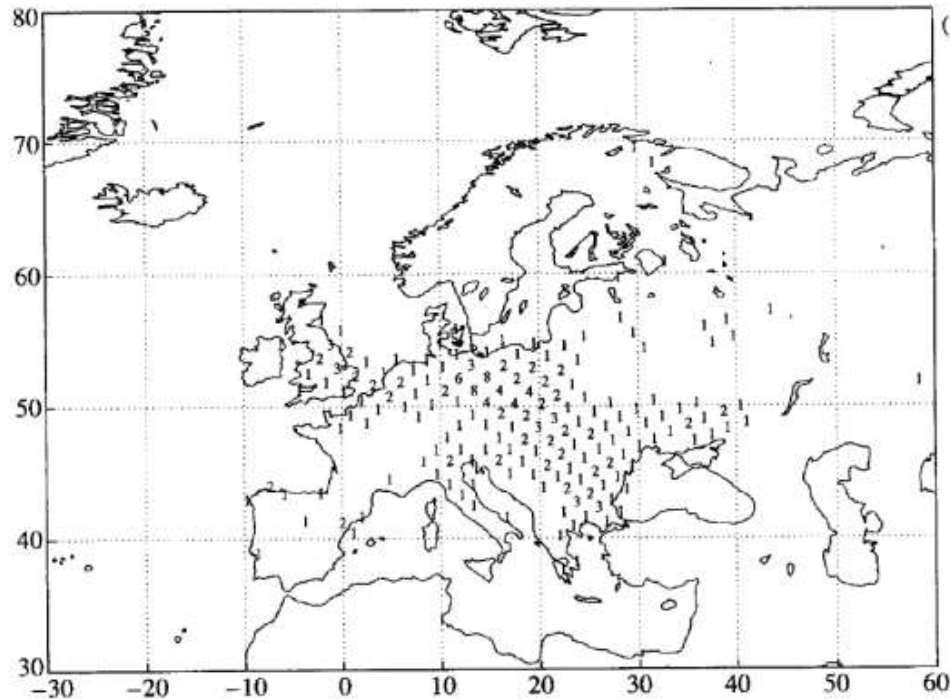


[Sitch et al., 2007]: MOSES-TRIFFID, 2100 г., сценарий SRES A2



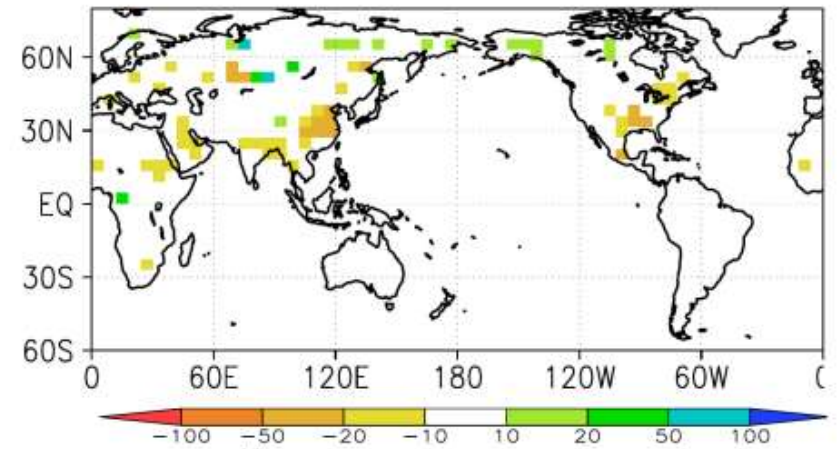
Влияние сернистого газа на интенсивность фотосинтеза

[Семенов и др., 1998]:
эмпирическая модель, к 1993 г.

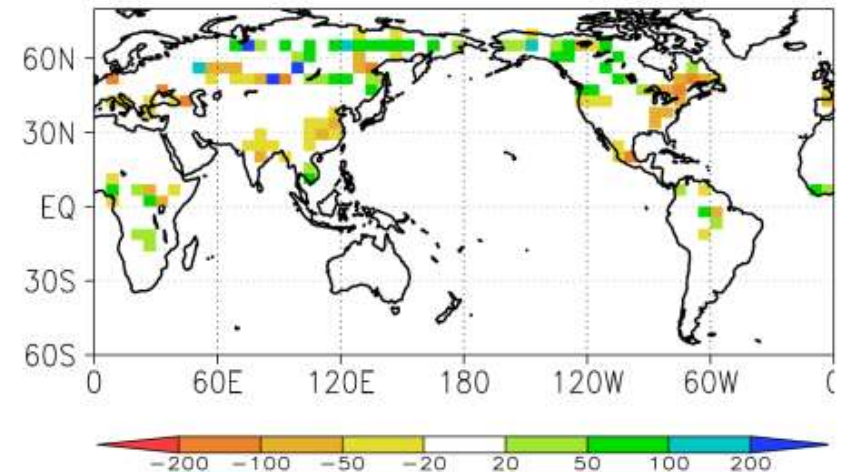


[Eliseev, 2015]: КМ ИФА РАН,
сценарий RCP 8.5

c) $\delta_{\text{eco}} f_{\text{GPP}}$ [$\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$], 2000–2010



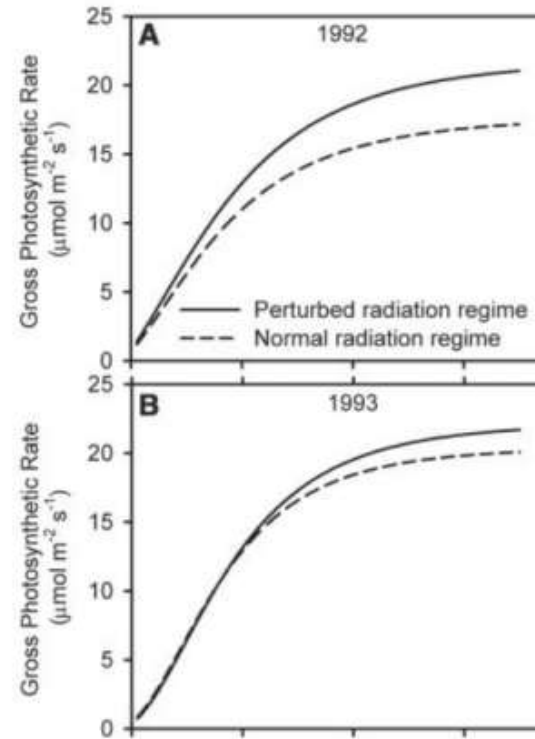
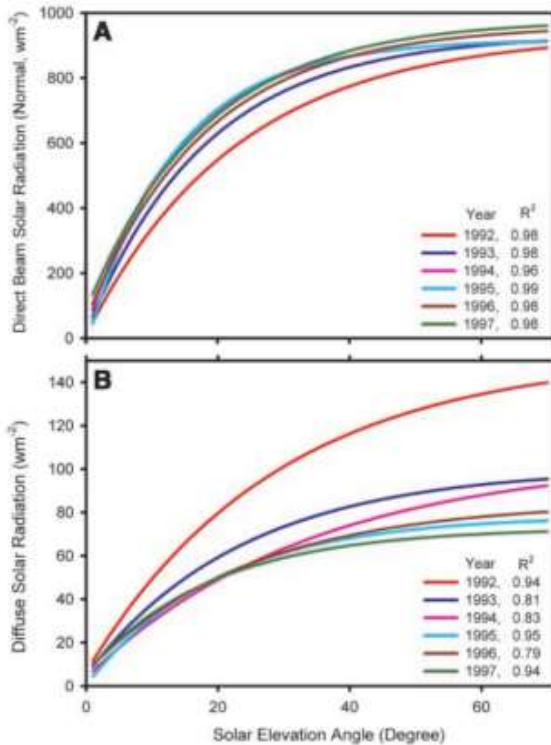
b) $\delta_{\text{eco}} c_v$ [gC m^{-2}], 2000–2010



Влияние рассеивающих аэрозолей

Увеличивают долю диффузной радиации в общем (ослабленном) потоке ФАР. Диффузная ФАР глубже проникает в листву и потенциально интенсифицирует фотосинтез затенённых листьев.

[Gu et al., 2003]: измерения + эмпирическая модель.

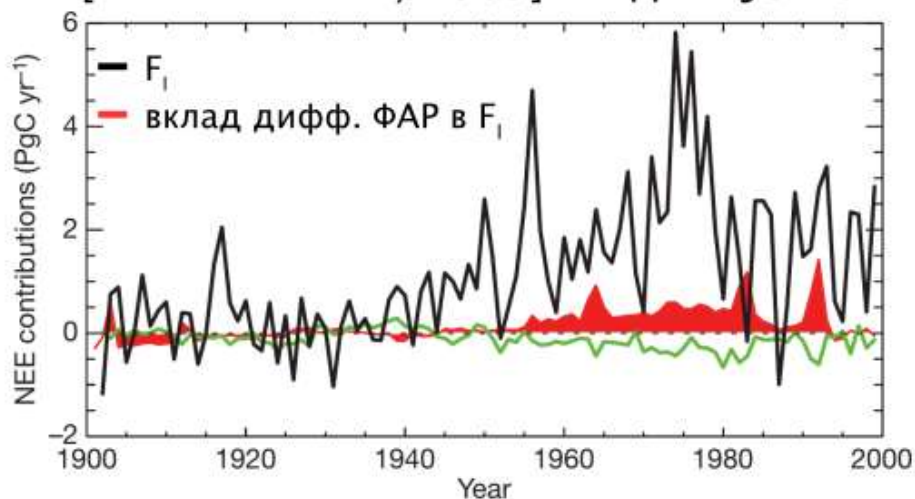


измерения проводились только в безоблачные дни \Rightarrow
эффект завышен [Angert et al., 2004: расчёты с CASA-TEM]

Влияние рассеивающих аэрозолей: расчёты с моделями

интенсификация фотосинтеза

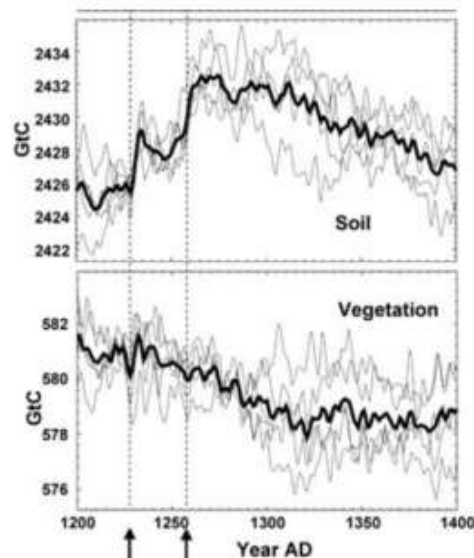
[Mercado et al., 2009]: модель JULES



[Володин и др., 2011]: в модели ИВМ геоинженерия увеличивает NPP на 0.5 ПгС/год, несмотря на более холодный и сухой климат

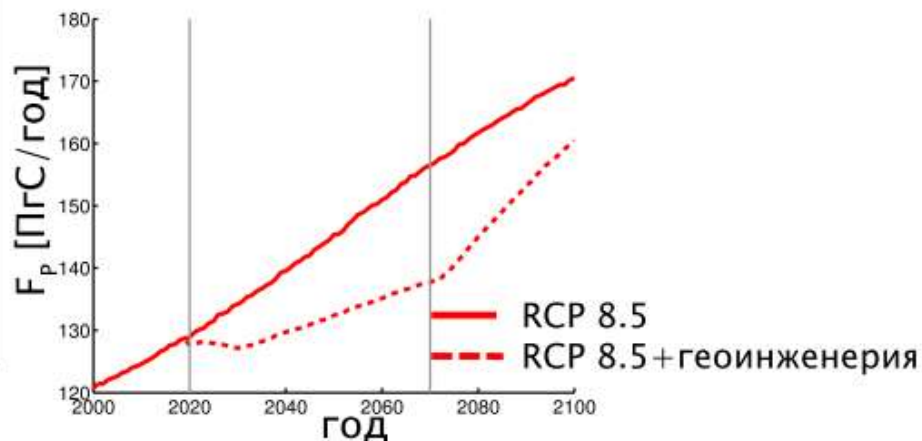
подавление фотосинтеза

[Brovkin et al., 2010]: MPI-ESM, вулканические извержения



F_s
уменьшается
при
уменьшении
температуры

[Елисеев, 2012]: КМ ИФА РАН



II. ВКЛАД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

Основные группы процессов земного углеродного цикла

Наземный углеродный цикл:

- Прямой (фертилизационный) эффект CO_2 увеличивает общую первичную продуктивность (за счёт частичного закрытия устьиц листьев) .
- Косвенный (климатический) эффект зависит от откликов интенсивностей фотосинтеза, автотрофного дыхания_a и гетеротрофного дыхания_h на изменения климата (в т.ч. при росте содержания CO_2 в атмосфере).

Океанический углеродный цикл

- Прямой эффект увеличения содержания CO_2 в атмосфере интенсифицирует SP (за счёт увеличения разности парциальных давлений CO_2 между атмосферой и океаном)
- Косвенный (климатический) эффект зависит от отклика температуры (а также солёности) океана (влияющих на растворимость CO_2 в воде) и океанической циркуляции на изменения климата (в т.ч. при росте содержания CO_2 в атмосфере).

Уже первые работы показали, что обратная связь между климатом и углеродным циклом является положительной

в 2100 г. при сценарии эмиссий SRES A2:

- HadCM3 [Cox et al., 2000] $I = + 250$ мкмоль/моль
- IPSL [Friedlingstein et al., 2001] $I = + 75$ мкмоль/моль

Был организован **Coupled Climate Carbon Cycle Intercomparison Project (C⁴MIP)**:

группы-участники провели численные эксперименты с заданными эмиссиями (SRES A2).

Всего участвовало 11 моделей (6 моделей общей циркуляции и 5 моделей промежуточной степени сложности).

В C⁴MIP $I = + (20-200)$ мкмоль/моль

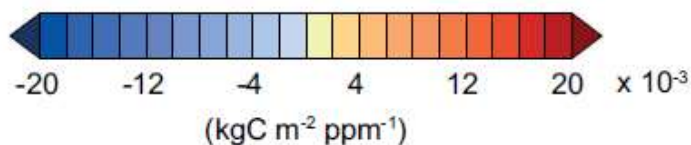
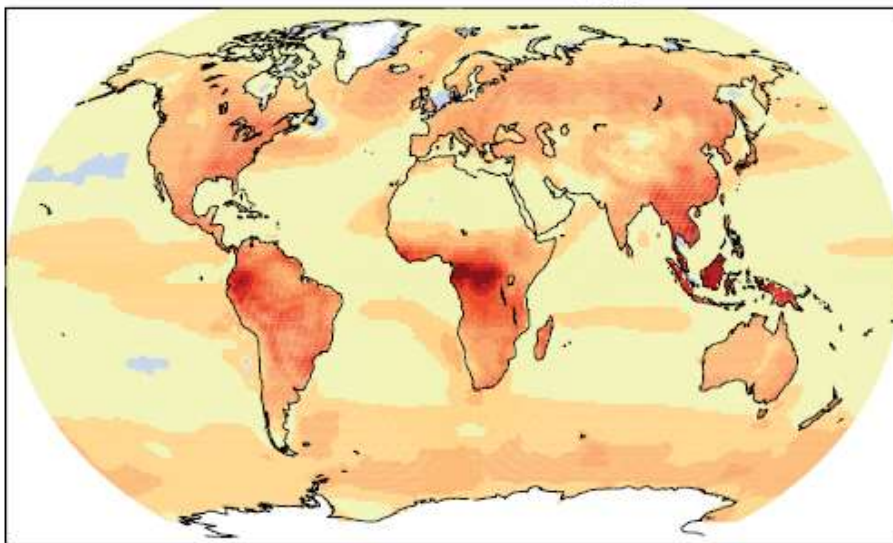
Оценка прямого и косвенного эффектов в наземном с углеродном цикле [IPCC, 2013]

Ансамбль моделей, расчёты с увеличением q_{CO_2} на 1%/год в течение 140 лет.

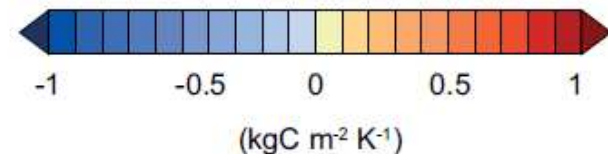
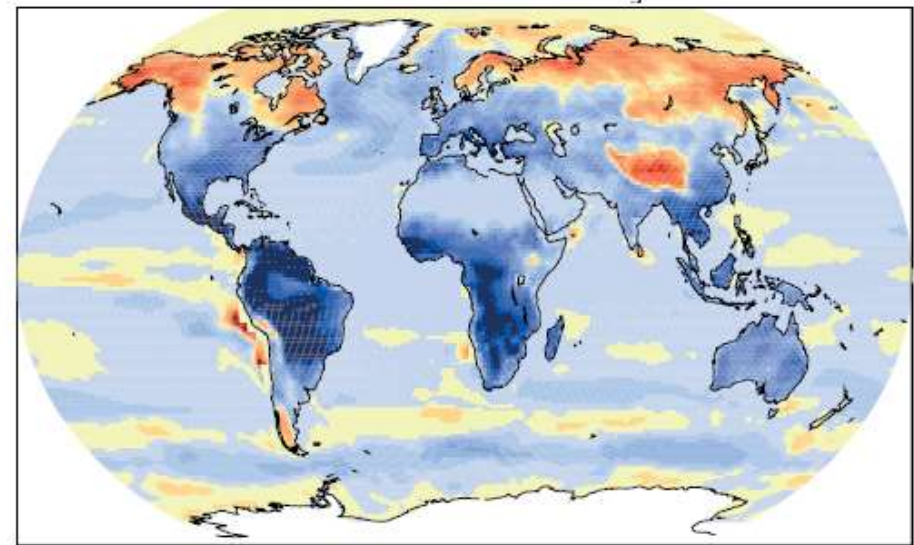
F – поток CO_2 из атмосферы в океан и наземные экосистемы на единицу площади

$$U = \int_t F(t) dt = U(q_{\text{CO}_2}, T_g)$$

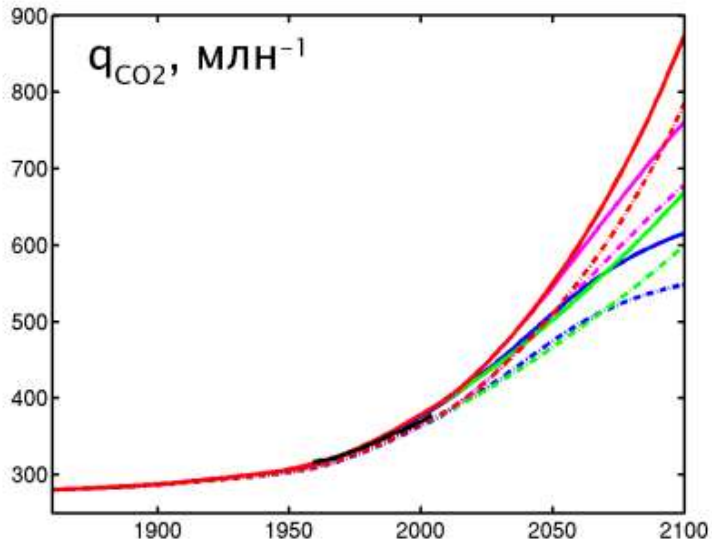
a) прямой эффект $\partial U / \partial q_{\text{CO}_2}$



b) косвенный эффект $\partial U / \partial T_g$



Влияние ОС между климатом и углеродным циклом на изменения климата (КМ ИФА РАН) [Елисеев и др., 2007]



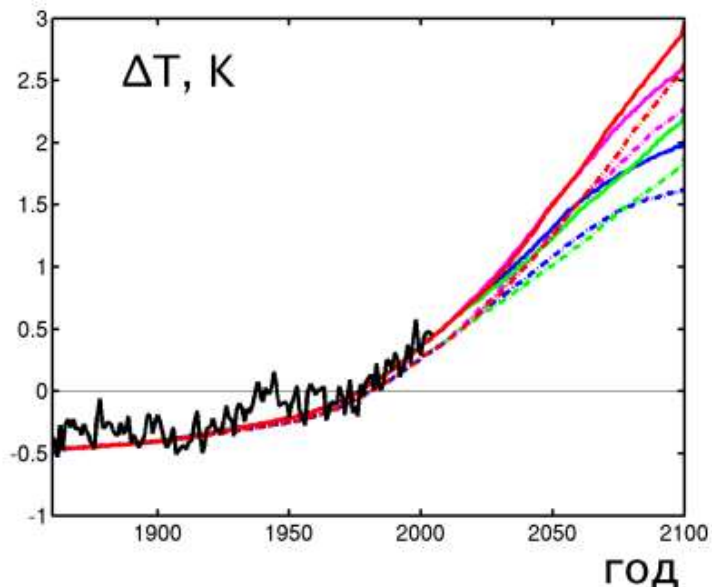
сплошные линии – полная модель
пунктир – модель с односторонней связью
(CO₂ → климат; климат ↯ CO₂)

SRES A2
 $q_{CO_2}(2100 \text{ г.}) = 875 \text{ млн}^{-1}$ (90 млн⁻¹)
3.38 K (0.31 K)

SRES A1B
 $q_{CO_2}(2100 \text{ г.}) = 762 \text{ млн}^{-1}$ (83 млн⁻¹)
 $\Delta T(2100 \text{ г.}) = 3.05 \text{ K}$ (0.34 K)

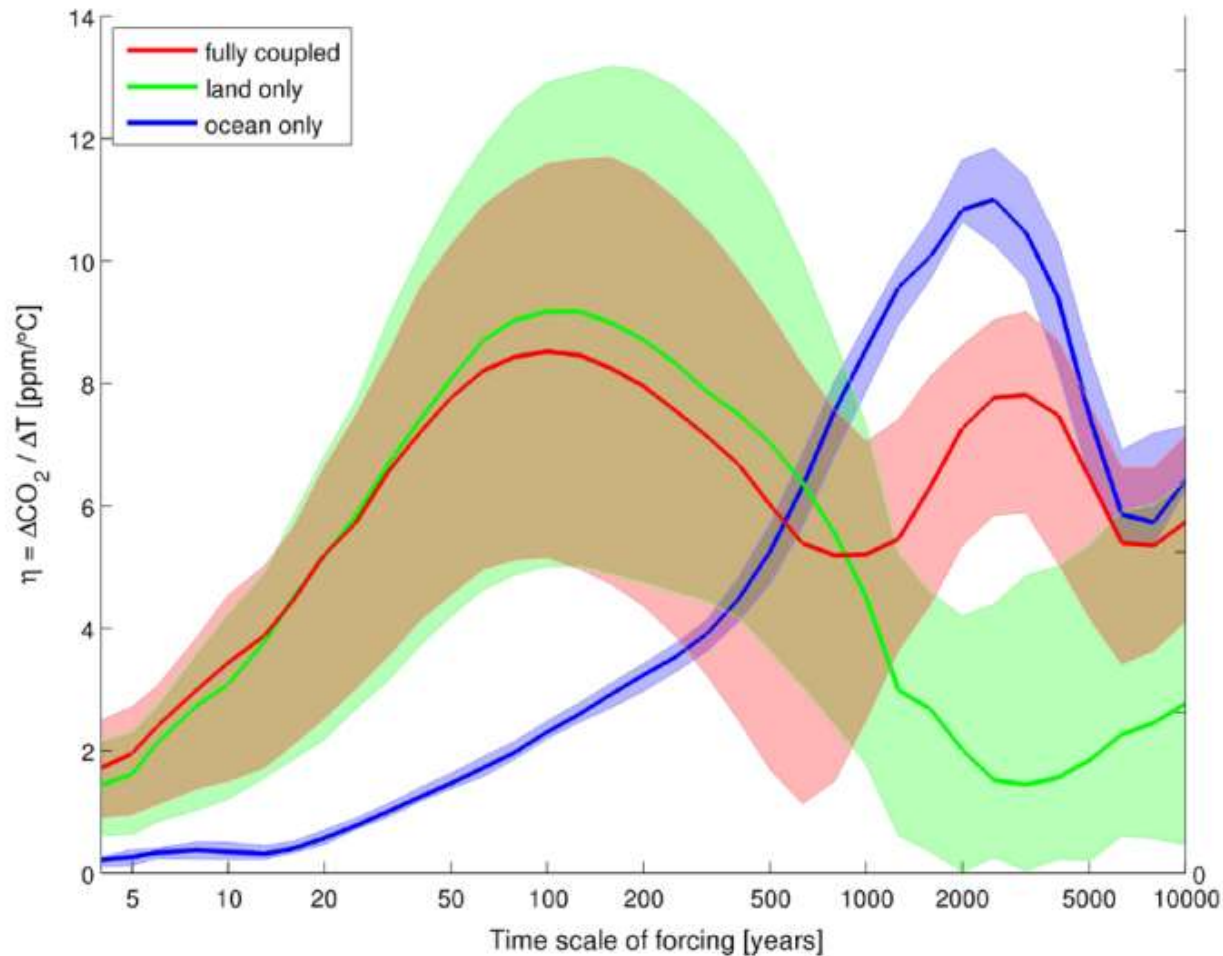
SRES B2
 $q_{CO_2}(2100 \text{ г.}) = 669 \text{ млн}^{-1}$ (69 млн⁻¹)
 $\Delta T(2100 \text{ г.}) = 2.65 \text{ K}$ (0.34 K)

SRES B1
 $q_{CO_2}(2100 \text{ г.}) = 615 \text{ млн}^{-1}$ (67 млн⁻¹)
 $\Delta T(2100 \text{ г.}) = 2.43 \text{ K}$ (0.35 K)

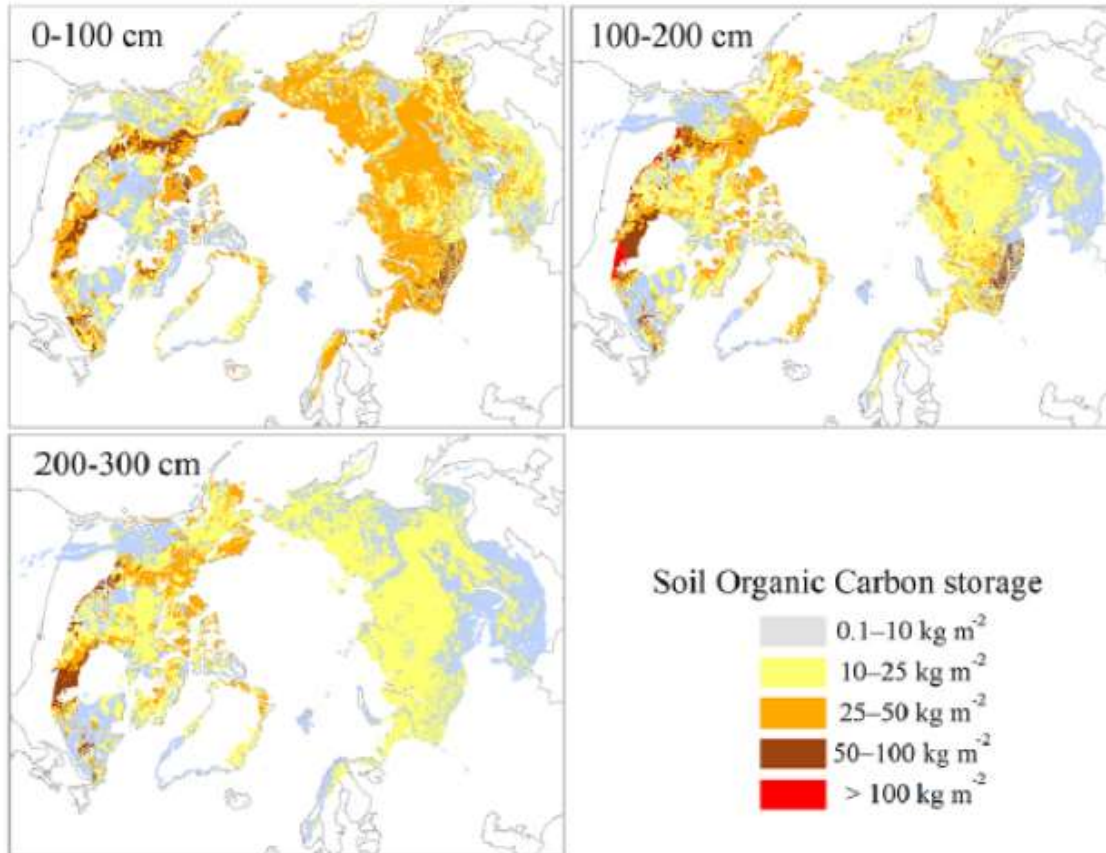


Взаимодействие климата и углеродного цикла увеличивает отклик на $\sim 1/10$

Зависимость коэффициента ОС между климатом и углеродным циклом от временного масштаба: модель Climber-2 [Willeit et al., 2014]



Запас углерода в почве средних и высоких широт NCSCDv2 [Hugelius et al., 2013]



Обобщение разных данных [McGuire et al., 2009]:

минеральная почва:
~1000 ПгС

торф: 200–450 ПгС

лёсс (едома+отложения в
дельтах рек):
200–400 ПгС

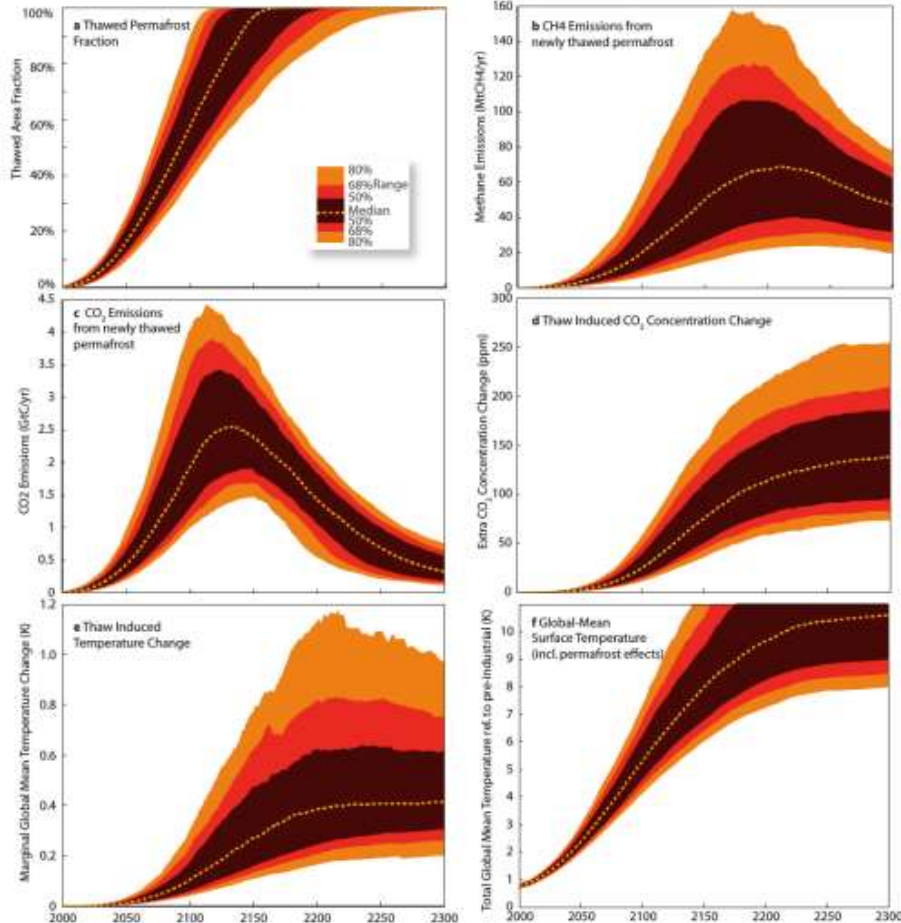
всего: 1400–1850 ПгС

всего: 1672 ПгС

глобально: 2344 ПгС [Jobbágy and Jackson, 2000]

Выделение углерода из почвы при таянии вечной мерзлоты

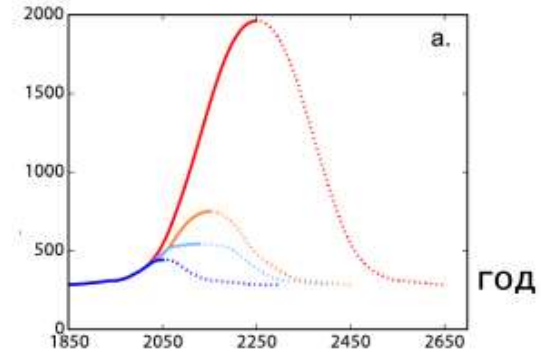
[Schneider von Deimling et al., 2012]
MAGICC6, RCP 8.5



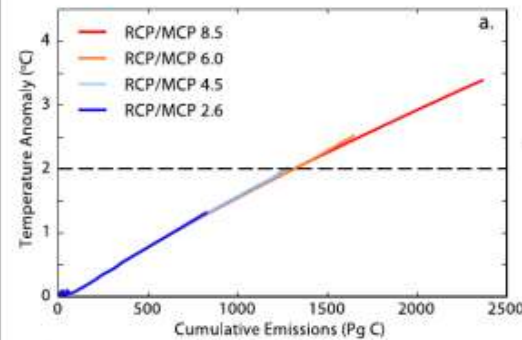
⇓
слабая ОС

[MacDougall et al., 2015], UVic EMIC
млн⁻¹

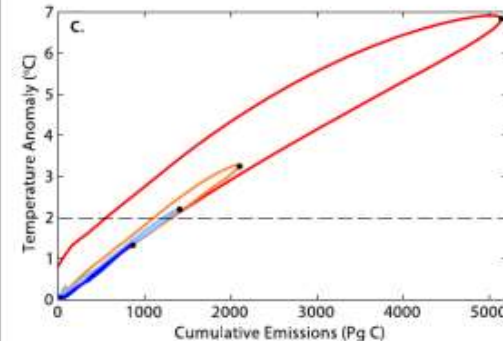
внешние
воздействия ⇒
(на примере
 q_{CO_2})



результаты



⇐ версия без эмиссий
CO₂ и CH₄ при
деградации вечной
мерзлоты

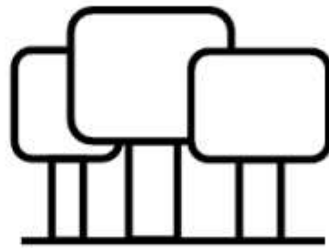


⇐ полная модель

⇓
сильная ОС

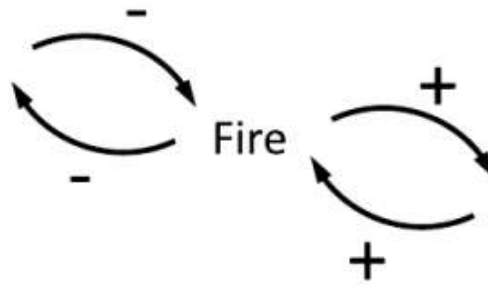
Возможная мультистабильность растительности из-за природных пожаров [Lasslop et al., 2016]

Расчёты с JSBACH при заданном атмосферном воздействии (с учётом годового хода)



Forest:

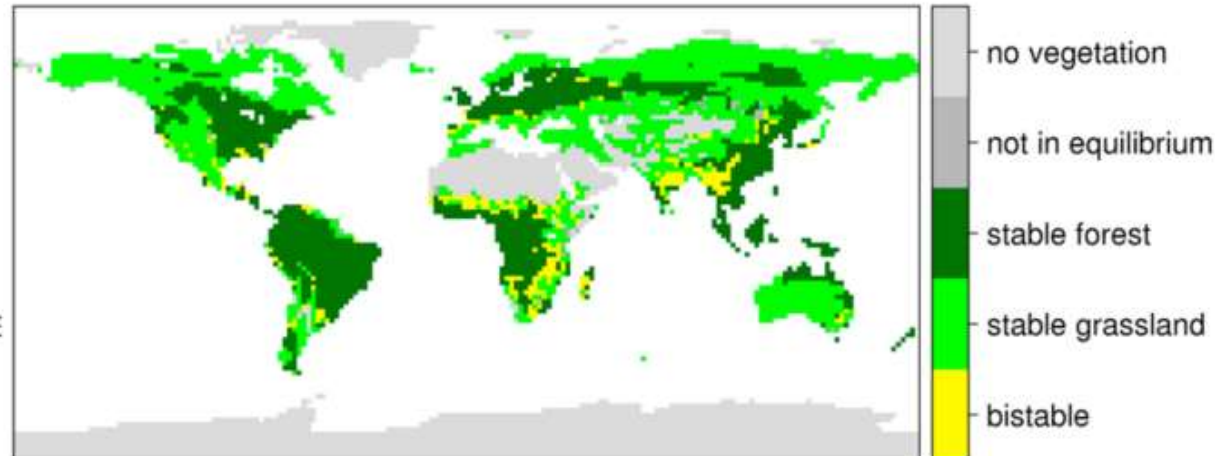
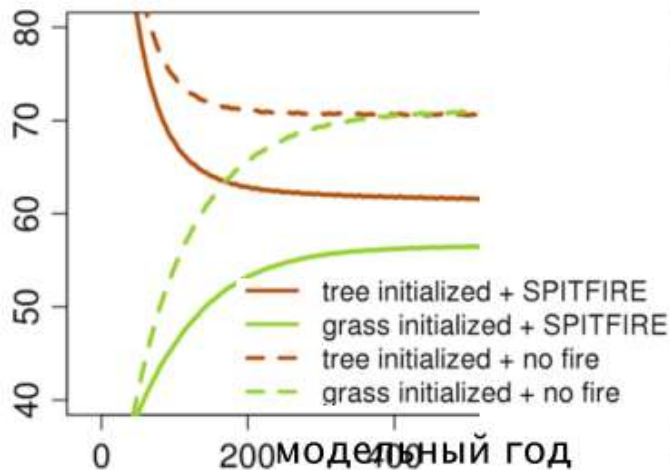
- Tree cover: high
- Few fires
- Coarse fuel
- Humid, cool microclimate



Grassland:

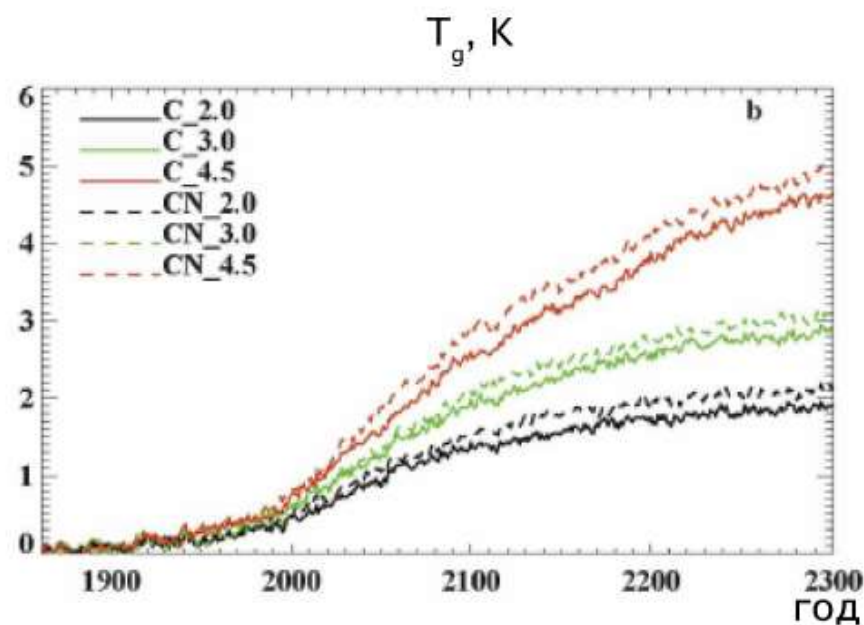
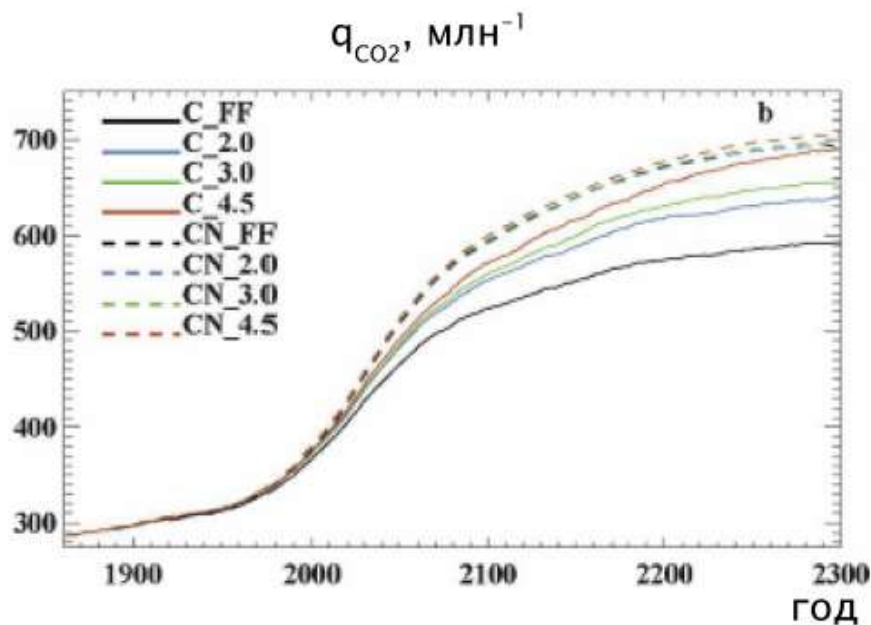
- Tree cover: low
- Frequent fires
- Fine fuel
- Hot, dry, windy microclimate

площадь лесов [млн км²]



Влияние азотного цикла на ОС между климатом и углеродным циклом [Sokolov et al., 2008]

Численные эксперименты с климатической моделью MIT (идеализированный сценарий антропогенных эмиссий CO_2)

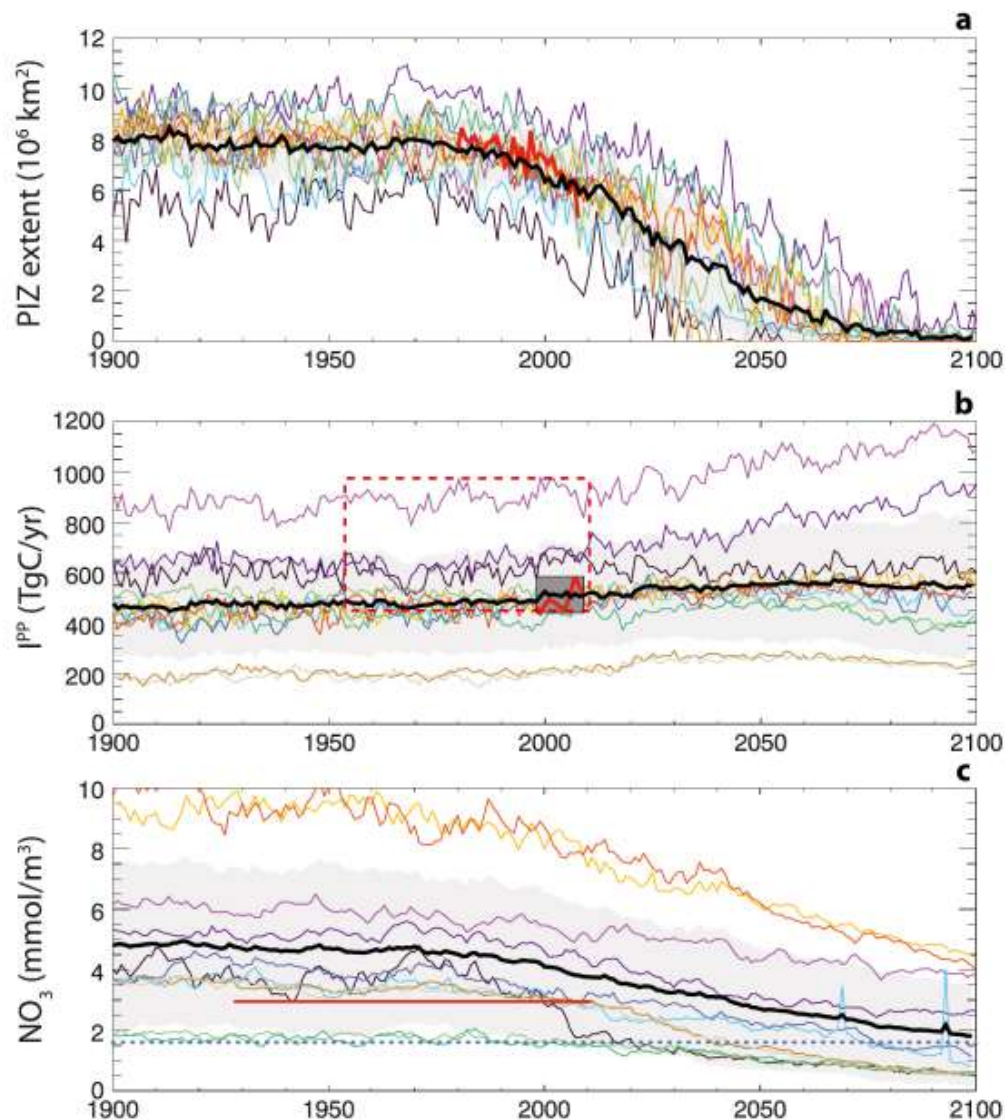


C — только углеродный цикл

CN — углеродный и азотный циклы

расчёты с версиями модели с разной чувствительностью климата к удвоению q_{CO_2}

Биологическая продуктивность Северного Ледовитого океана CMIP5 RCP 8.5 (11 моделей) [Vancoppenolle et al., 2013]



наблюдения:

площадь распространения многолетнего морского льда (PIZ):
спутниковые данные OSISAF

биологическая продукция I^{PP} :
спутниковые данные для Chl- α [Arrigo and van Dijken, 2011]
(сплошная линия)
прямые измерения [Hill et al., 2013]
(пунктир)

NO_3 : World Ocean Atlas (WOA)
[Garcia et al., 2010]

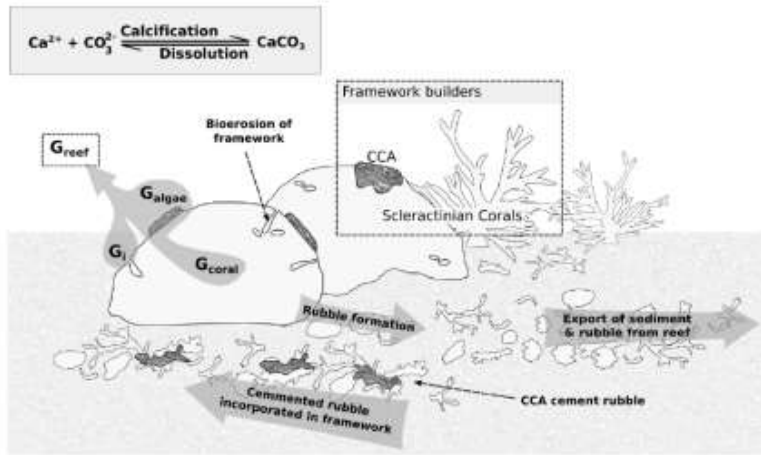
Увеличение I^{PP} , связанное с исчезновением морского льда, ограничивается доступным NO_3

Результаты сильно различаются между моделями

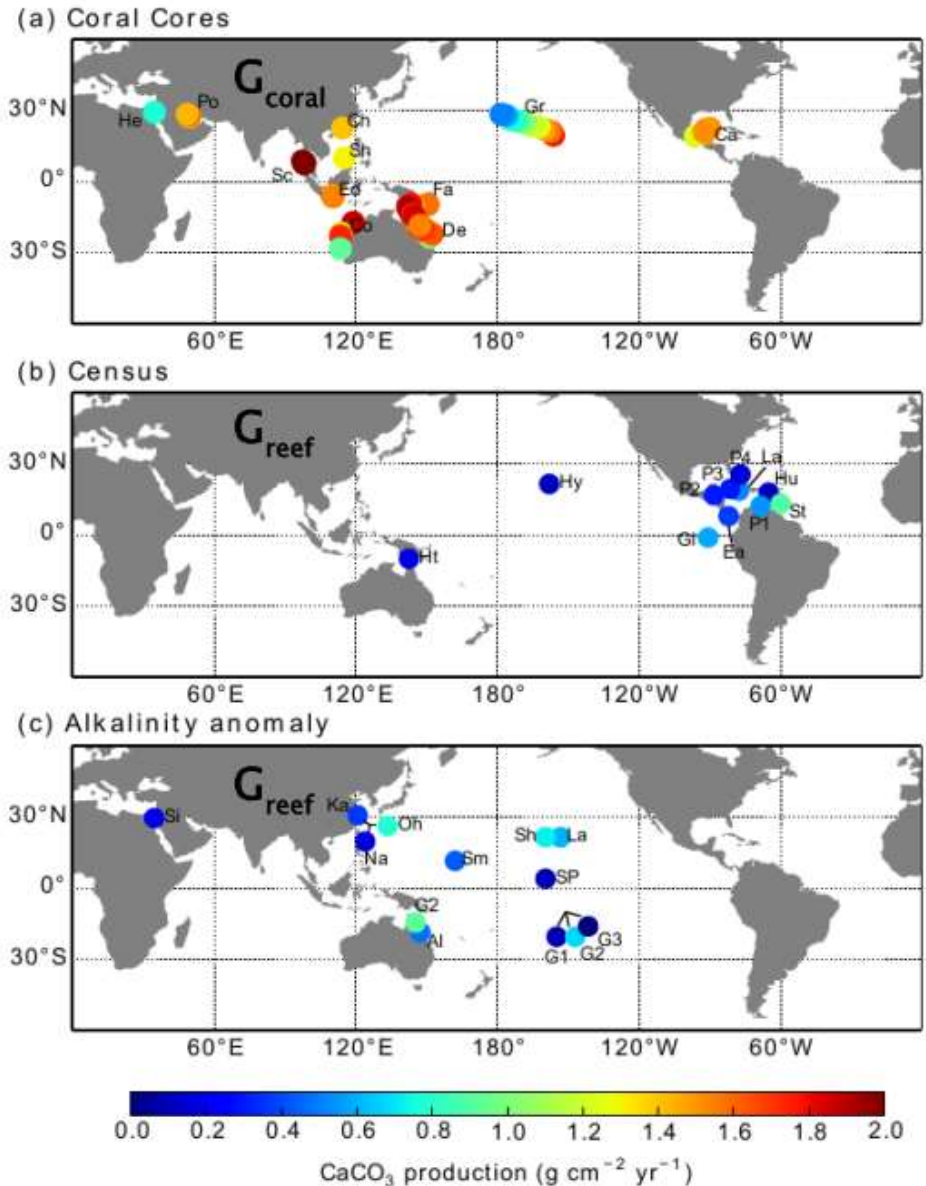
Выводы

- Цикл CO_2 играет существенную роль в земной системе. В нём можно выделить ветви, связанные с наземными экосистемами, с океаном (включая неорганическую и органическую части) и геологическими источниками. Значимость каждой из этих ветвей зависит от временного масштаба изменений состояния земной системы.
- **Содержание CO_2 в атмосфере q_{CO_2} существенно менялось в прошлые геологические эпохи. Изменения q_{CO_2} в исторический период обусловлены, в основном, антропогенными эмиссиями этого газа.**
- В связи с внедрением в климатические модели схем углеродного цикла (и, соответственно, с превращением этих моделей в модели земной системы) было введено понятие обратной связи между климатом и углеродным циклом. Во всех современных моделях земной системы эта связь положительна – климатические изменения, сопровождающие увеличение q_{CO_2} , приводят к ослаблению поглощения CO_2 из атмосферы (прежде всего за счёт влияния изменений климата на состояние наземных экосистем). Это качественно согласуется с наблюдениями.
- **Положительная обратная связь между климатом и углеродным циклом положительна усиливает на ~10% отклик температуры на антропогенные эмиссиях CO_2 в XXI веке.**
- Количественные различия модельных оценок могут быть связаны с недостаточным учётом взаимодействия углеродного цикла с другими биогеохимическими циклами.

Органический углеродный цикл океана: кораллы [Jones et al., 2015]



глобально:
0.08–0.10 ПгС/год
[Vecsei, 2004]



Обратная связь между климатом и углеродным циклом

Проводятся два численных эксперимента с совместной моделью климата–углеродного цикла при задании одного и того же сценария эмиссий CO_2

coupled (c): полная модель.

uncoupled (u): одностороннее взаимодействие (изменения климата не влияют на углеродный цикл, в котором учитывается только прямые эффекты CO_2 на F_1 и F_{oc})

Параметр обратной связи: $f = \Delta p\text{CO}_2^c / \Delta p\text{CO}_2^u$

Коэффициент усиления: $g = f / (f - 1)$

$f > 1, g > 0 \Rightarrow$ **положительная ОС** (увеличиваются рост $p\text{CO}_2$ и потепление климата по сравнению со случаем, когда нет влияния климатических изменений на углеродный цикл)

$f < 1, g < 0 \Rightarrow$ **отрицательная ОС**

Диагностика ОС между климатом и углеродным циклом

$$U_x = \int_0^t F_x(\tau) d\tau = \beta_x \Delta q_{\text{CO}_2} + \gamma_x \Delta T_g, \quad X = l, o$$

β_x характеризует прямые эффекты изменения CO_2 на обмен между резервуарами,
 γ_x характеризует ОС между климатом и углеродным циклом.

Для C⁴MIP

$$\beta_l = 0.2-2.8 \text{ ГтС/млн}^{-1}$$

$$\beta_o = 0.8-1.6 \text{ ГтС/млн}^{-1}$$

$$\gamma_l = - (20-177) \text{ ГтС/К}$$

$$\gamma_o = - (14-67) \text{ ГтС/К}$$

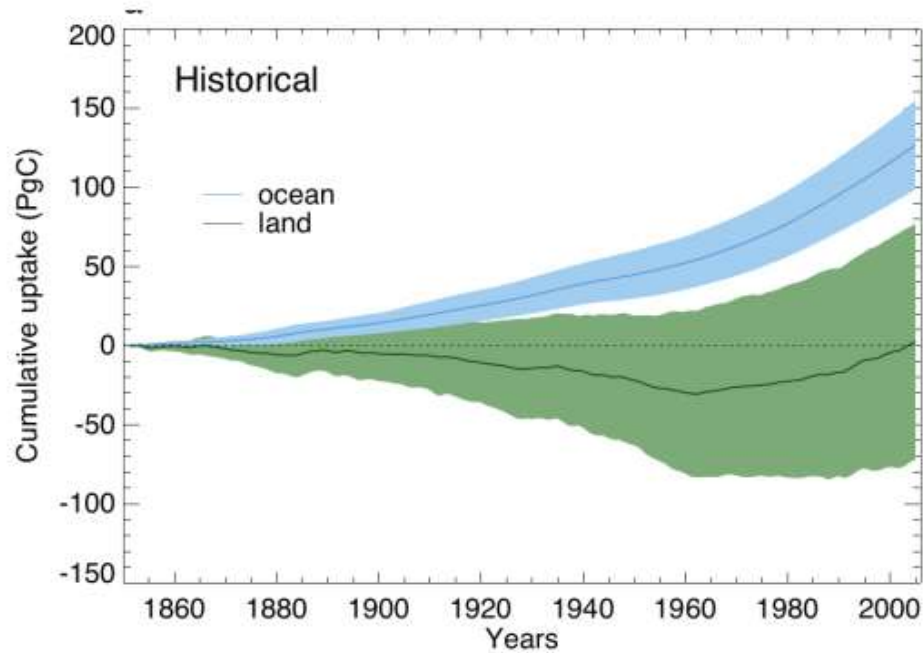


Прямой эффект роста концентрации CO_2 в атмосфере увеличивает сток углекислого газа из атмосферы в океан и наземные экосистемы

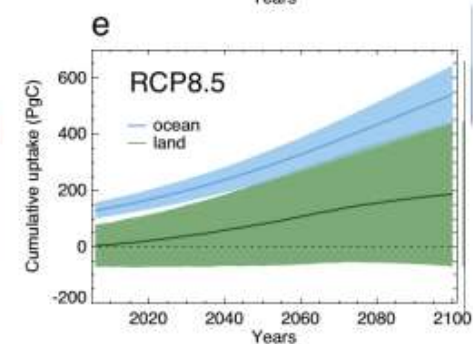
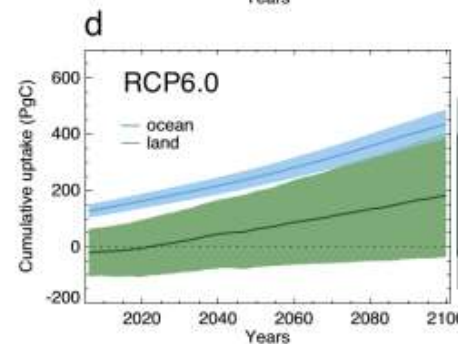
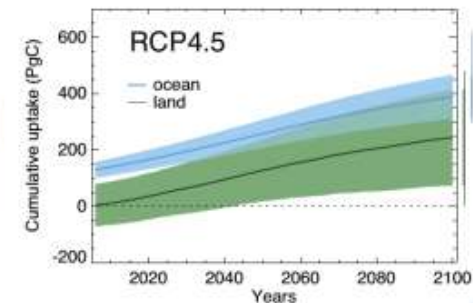
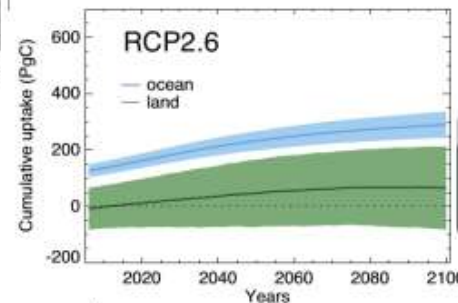


Косвенные (климатические) эффекты уменьшают сток CO_2 из атмосферы

Поглощение CO₂ из атмосферы (модели CMIP5) [IPCC AR5]

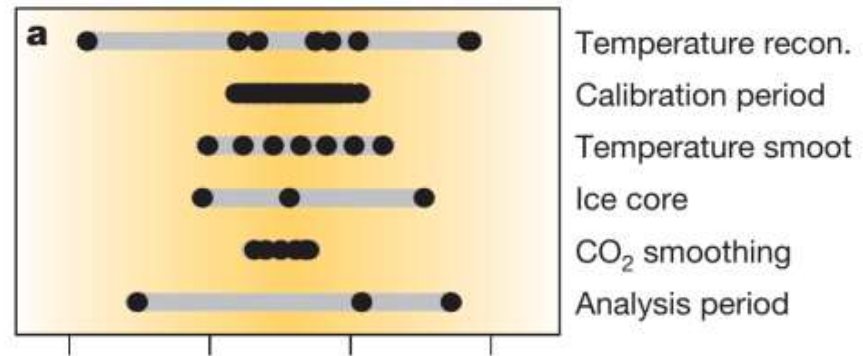


- океан (среднее по ансамблю)
- океан (межмодельное СКО)
- суша (среднее по ансамблю)
- суша (межмодельное СКО)



Эмпирические оценки коэффициента ОС между климатом и углеродным циклом [Frank et al., 2010]

реконструкции
для последнего
тысячелетия



модели земной
системы

