



Глобальный цикл CO_2

А.В. Елисеев

**ИФА им. А.М. Обухова РАН
Казанский (Приволжский) федеральный
университет**

семинар ИГКЭ 26.04.2017

Структура

ВВЕДЕНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЛОБАЛЬНОМ УГЛЕРОДНОМ ЦИКЛЕ

- Наземный углеродный цикл
- Углеродный цикл океана
- Атмосфера
- Геологические источники
- Антропогенное возмущение углеродного цикла

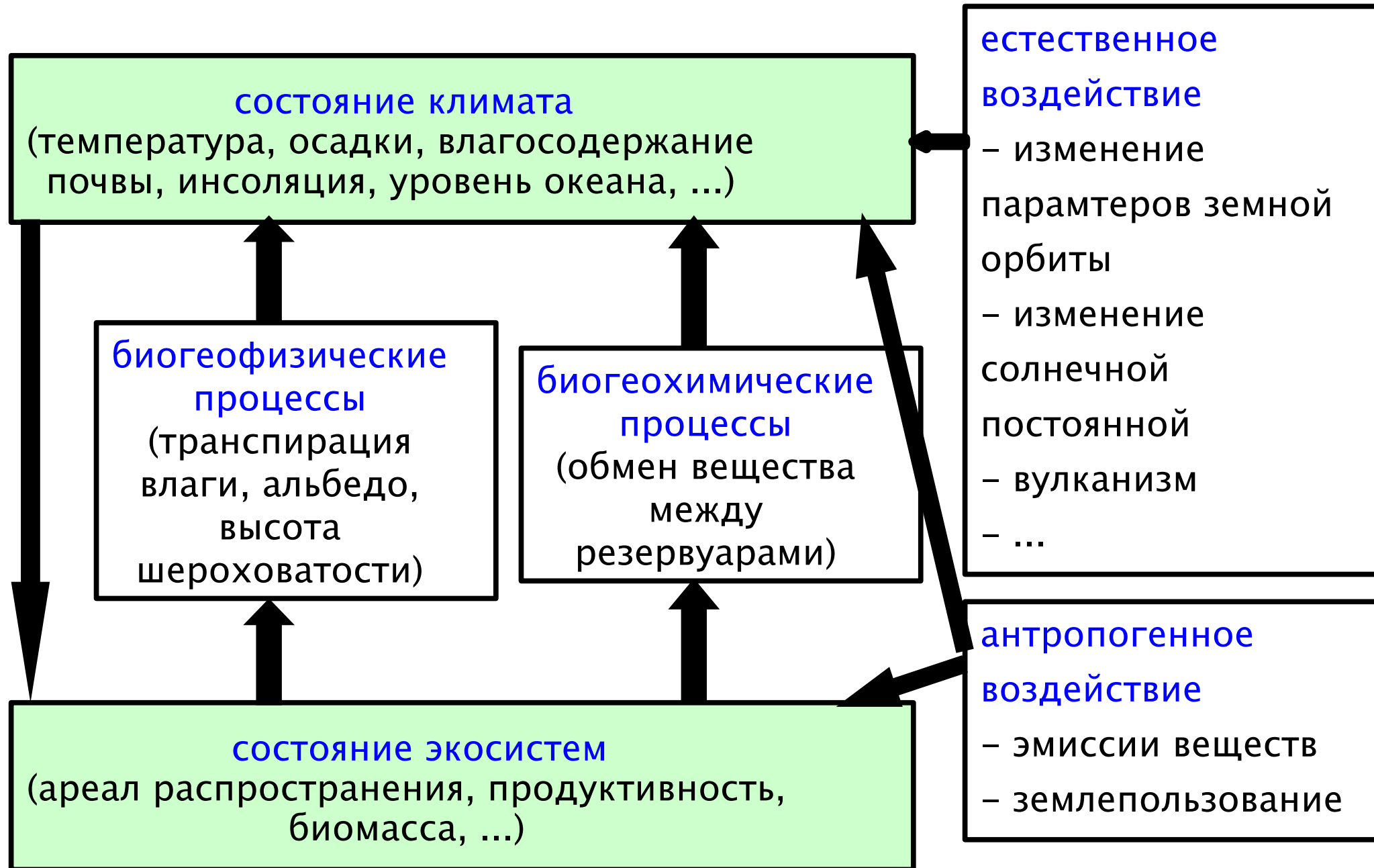
ВКЛАД ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

- Обратная связь между климатом и углеродным циклом
- Взаимодействие циклов углерода и азота

ВЫВОДЫ

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЛОБАЛЬНОМ УГЛЕРОДНОМ ЦИКЛЕ

Взаимодействие климата и экосистем



Основные биогеохимические циклы

- **углеродный:**

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

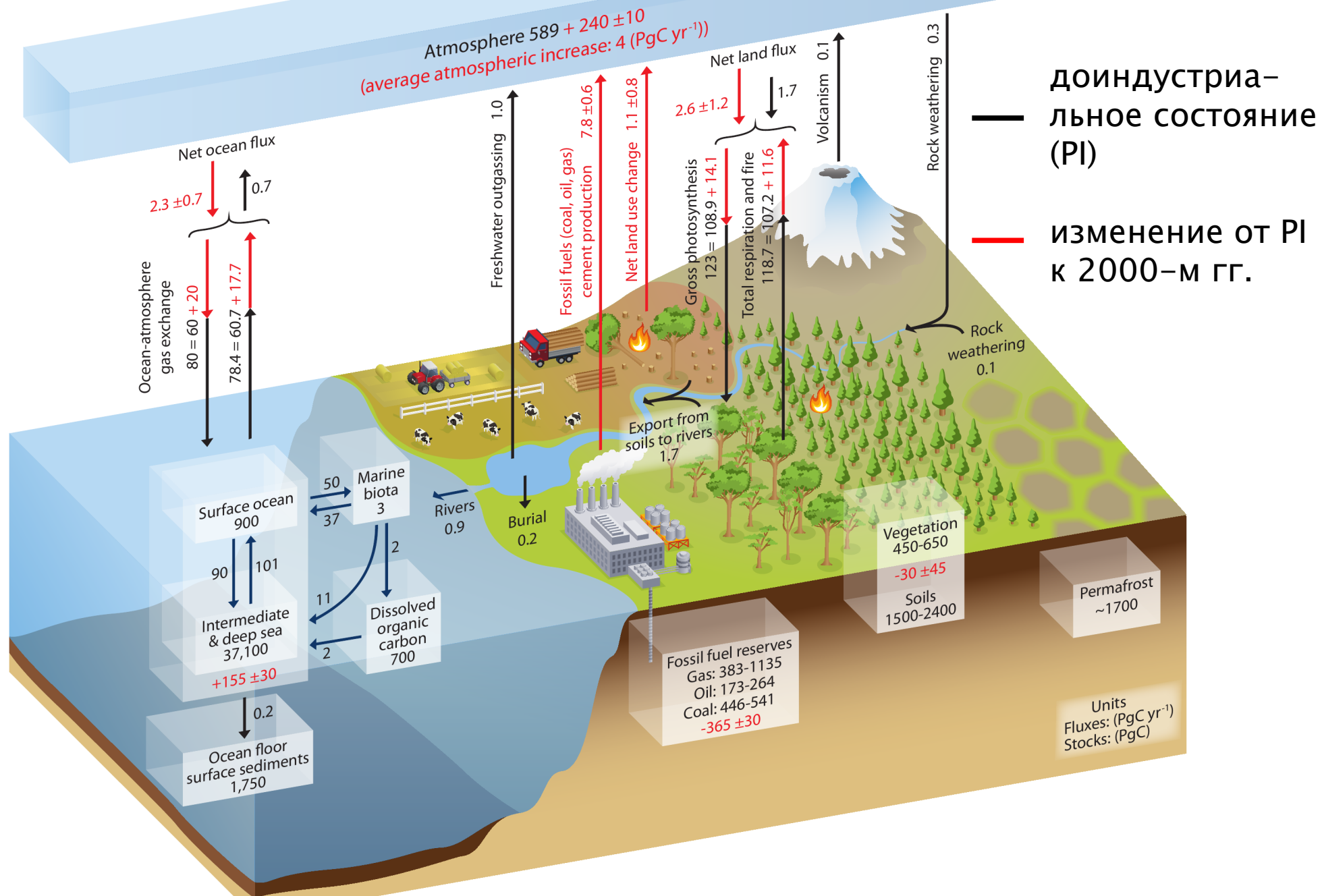
- **азотный:**

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

- **фосфорный**

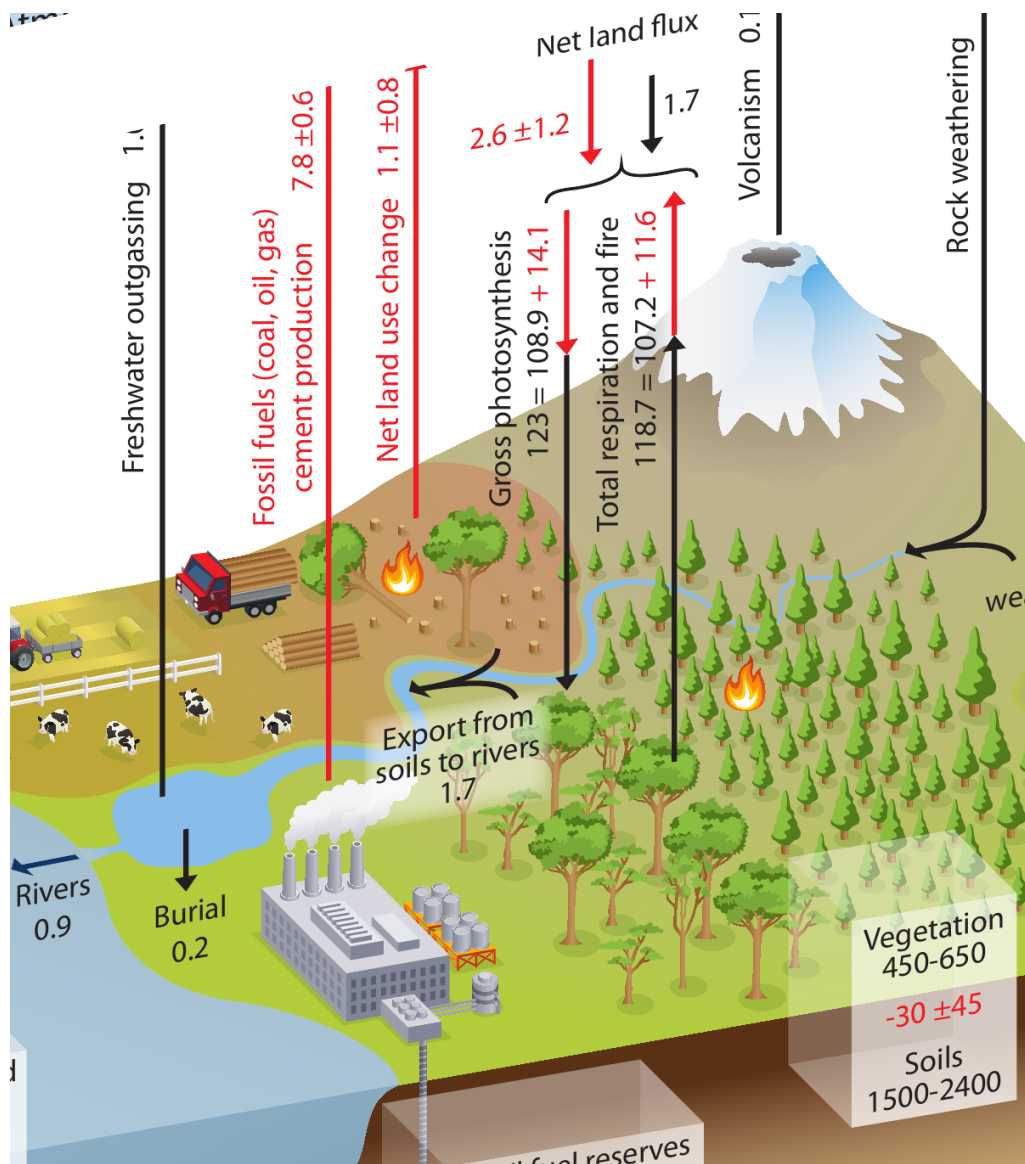
- ...

Глобальный углеродный цикл [IPCC AR5]



Наземный углеродный цикл (1)

[IPCC AR5]



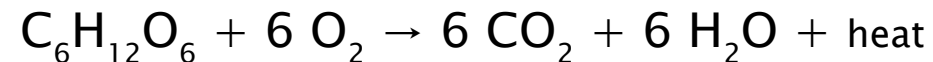
Поглощение CO₂

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

F_p – интенсивность фотосинтеза:



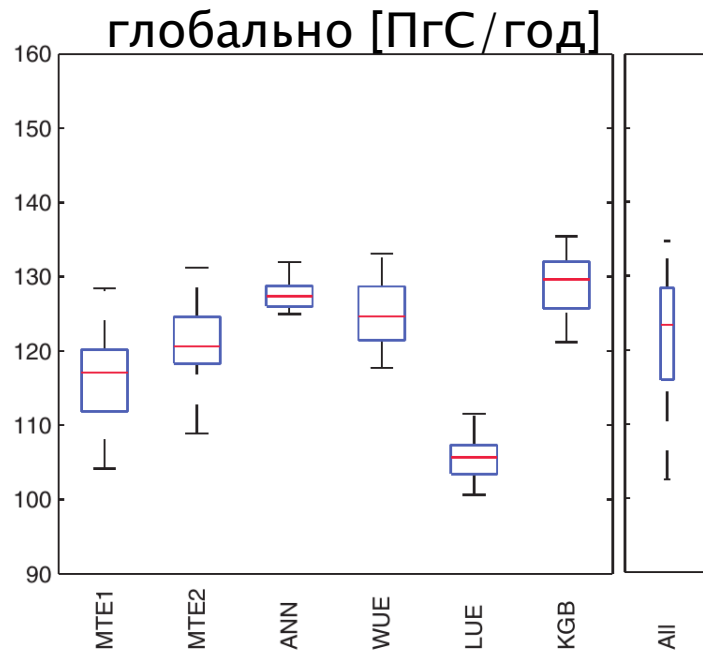
F_v – автотрофное дыхание (дыхание растений)



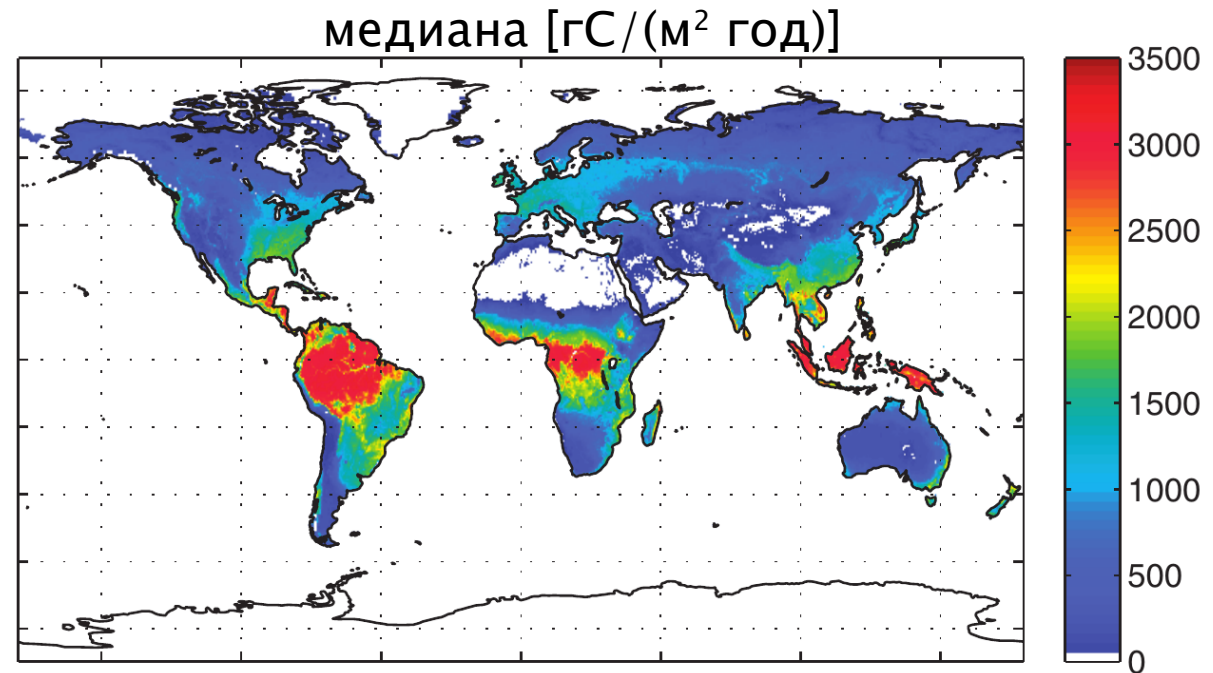
F_s – гетеротрофное дыхание (разложение органики почвы бактериями, микробами и археями)

F_f – выделение CO₂ из-за природных пожаров

Интенсивность фотосинтеза [Beer et al., 2010]

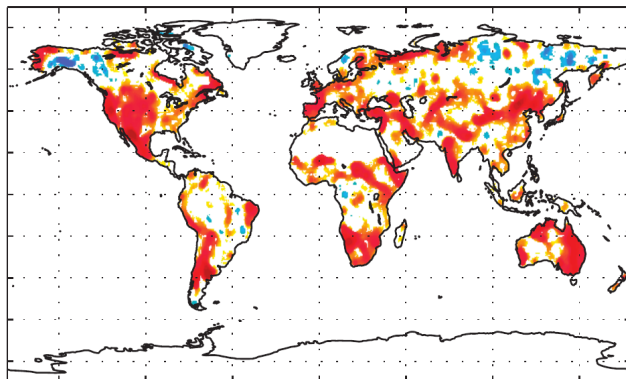


$$F_p = 123 \pm 8 \text{ ПгС/год}$$

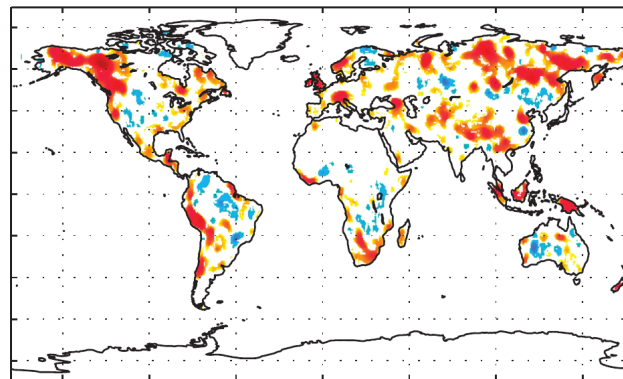


корреляции с климатическими переменными

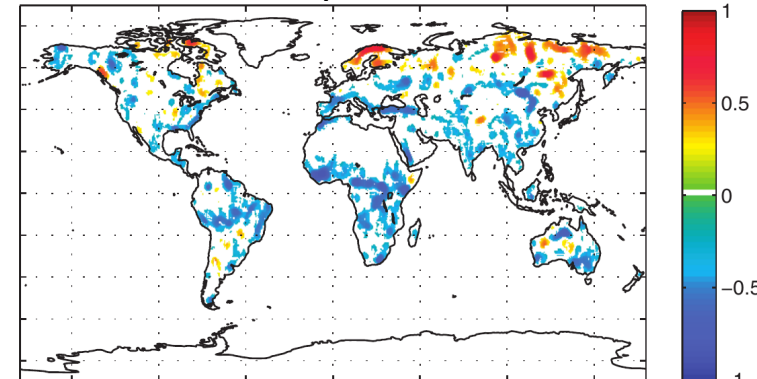
осадки



приземная температура



коротковолновая радиация
на поверхности



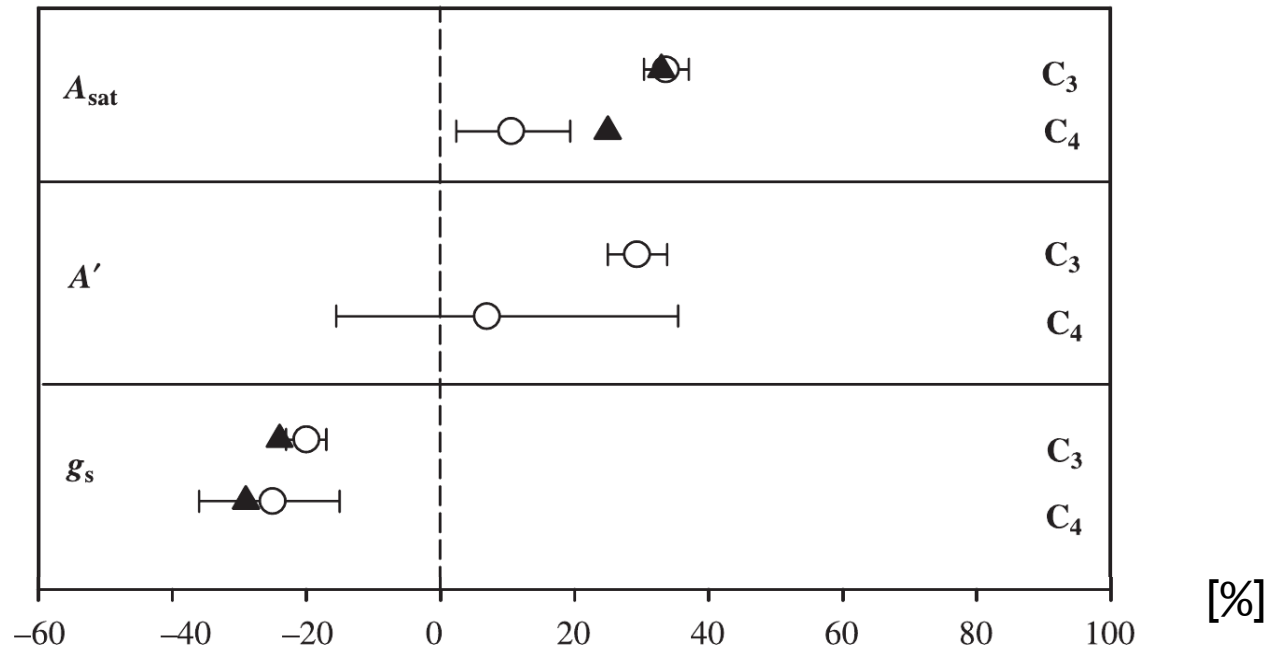
Эффект фертилизации растений атмосферным CO₂: эксперименты FACE (Free-Air CO₂ Enrichment) [Ainsworth, Long, 2005]

Изменение при искусственном увеличении q_{CO_2}

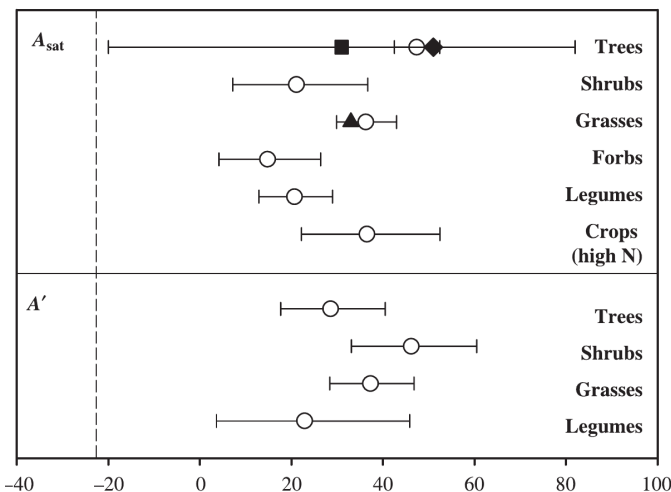
насыщающая ИФ
(без ограничения ФАР)

ИФ за сутки

устыичная
проводимость



растения C₃

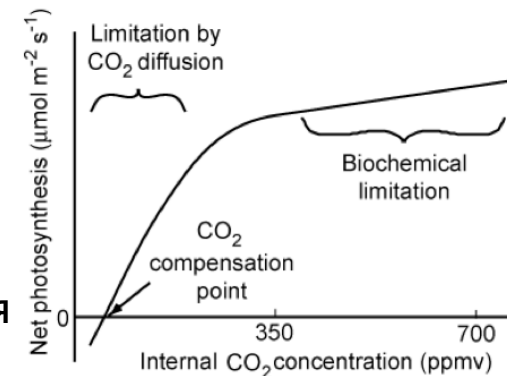


закон Михаэлиса-Ментен:

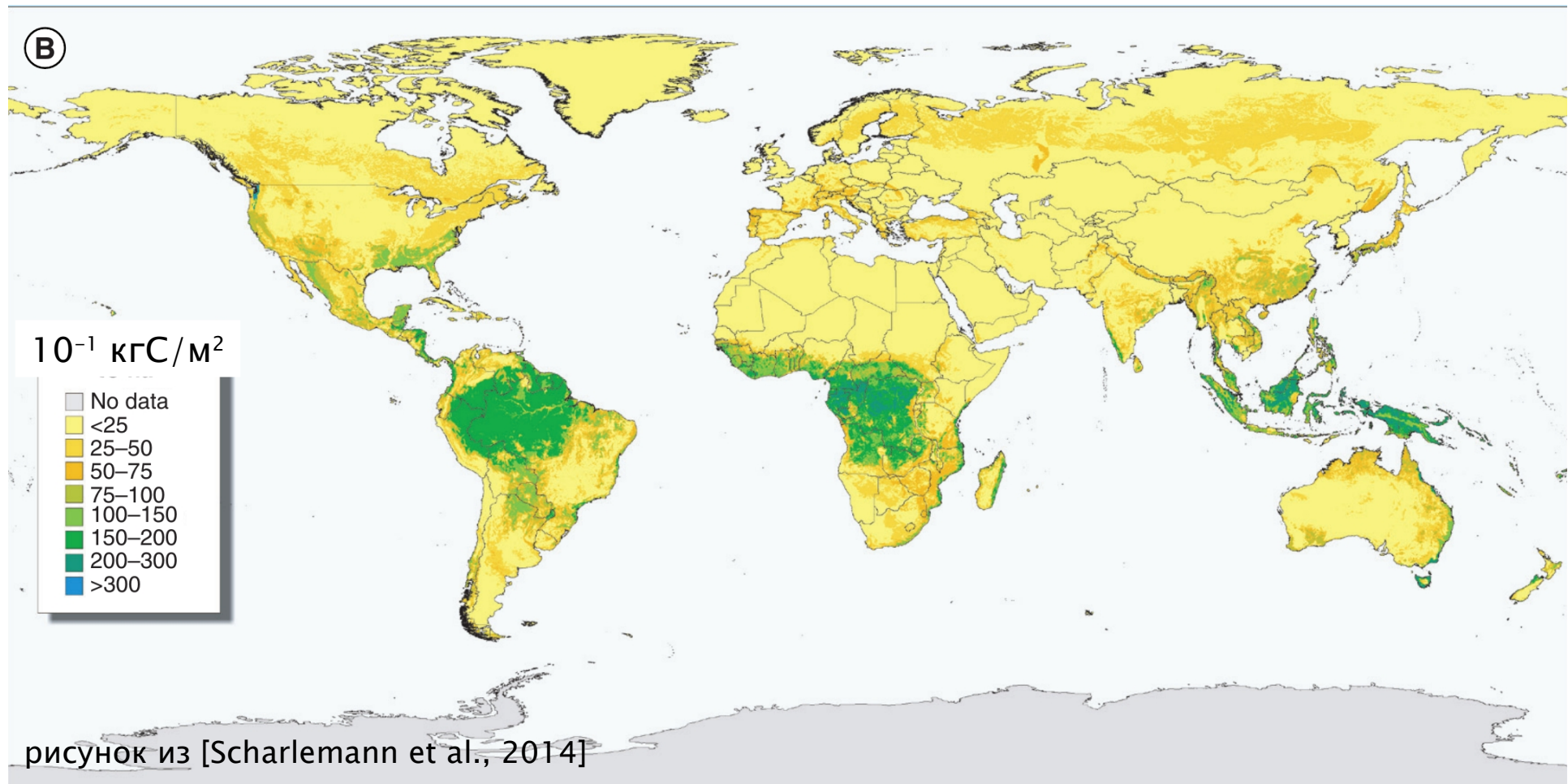
$$F_p \sim q_i / (q_i + q_{1/2})$$

$q_i \approx (1.6-4) q_{\text{CO}_2}$ – 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)



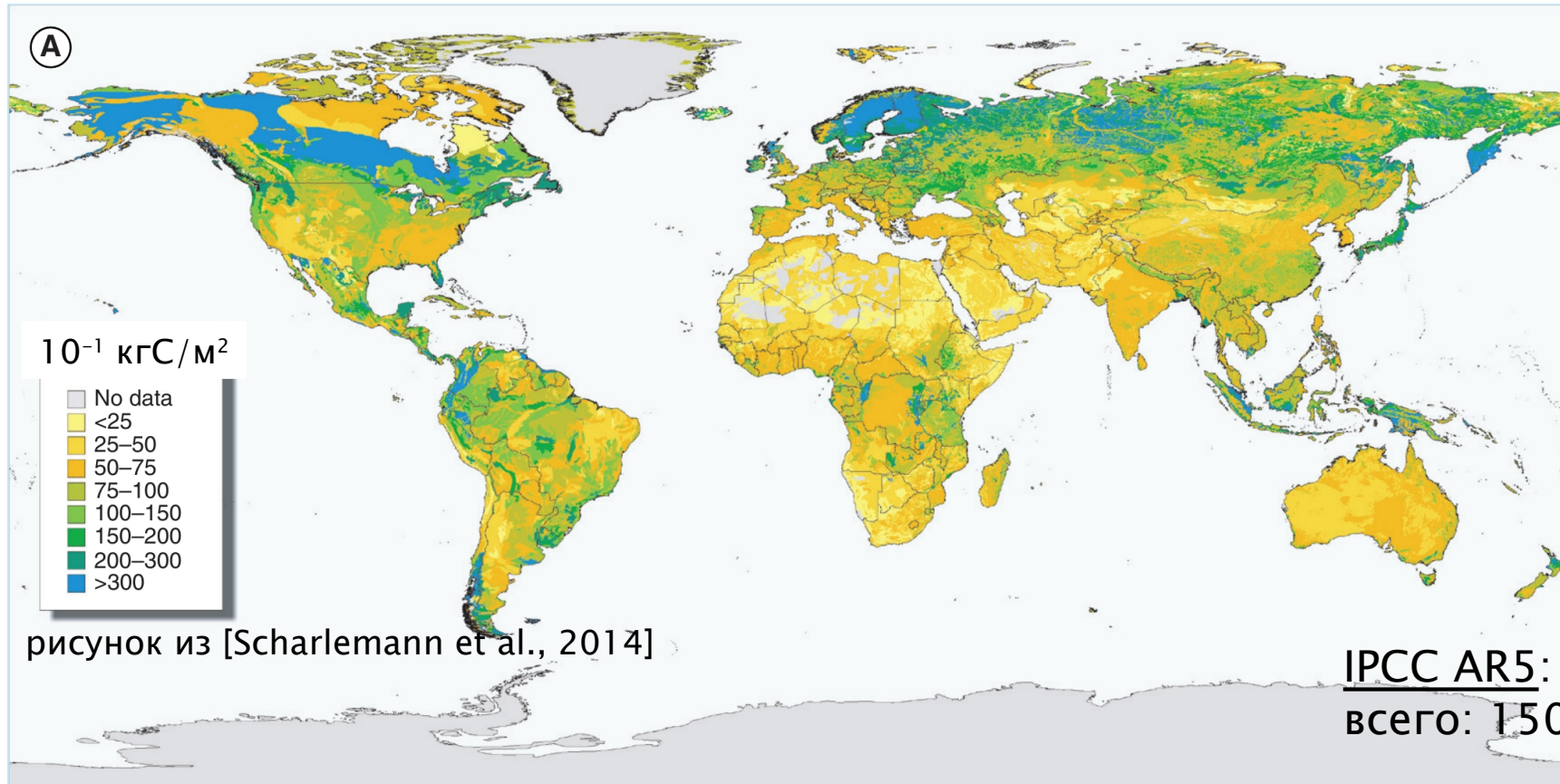
IPCC AR5:

всего: 450–650 ПгС

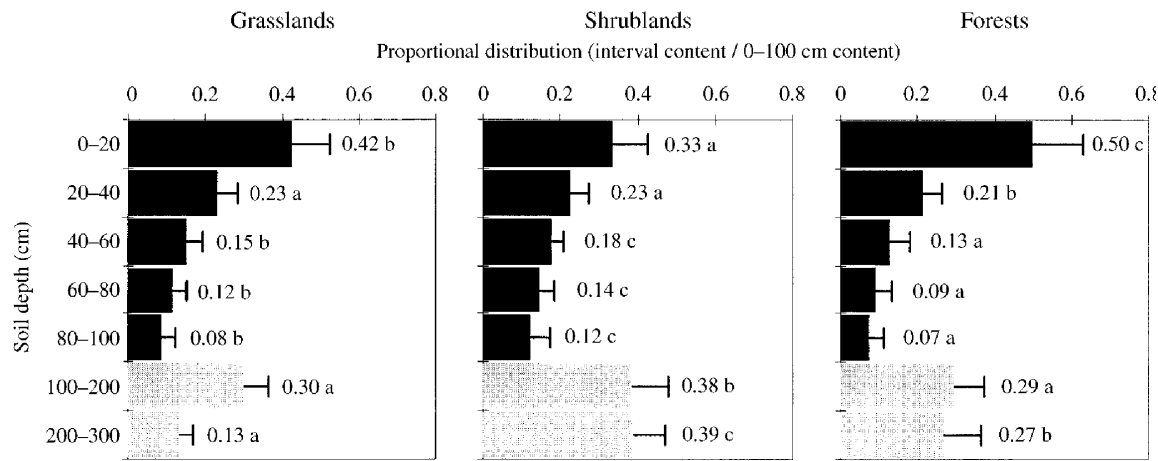
за индустриальный период: -30 ± 45 ПгС

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]

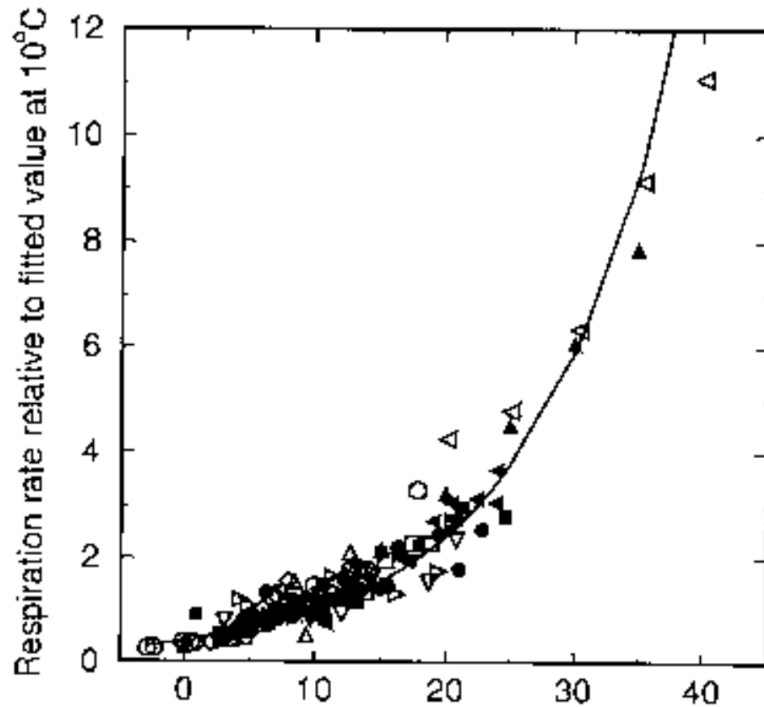


0–100 см: 1502 ПгС
0–300 см: 2442 ПгС

Гетеротрофное дыхание

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

температура T [Lloyd-Taylor, 1994]

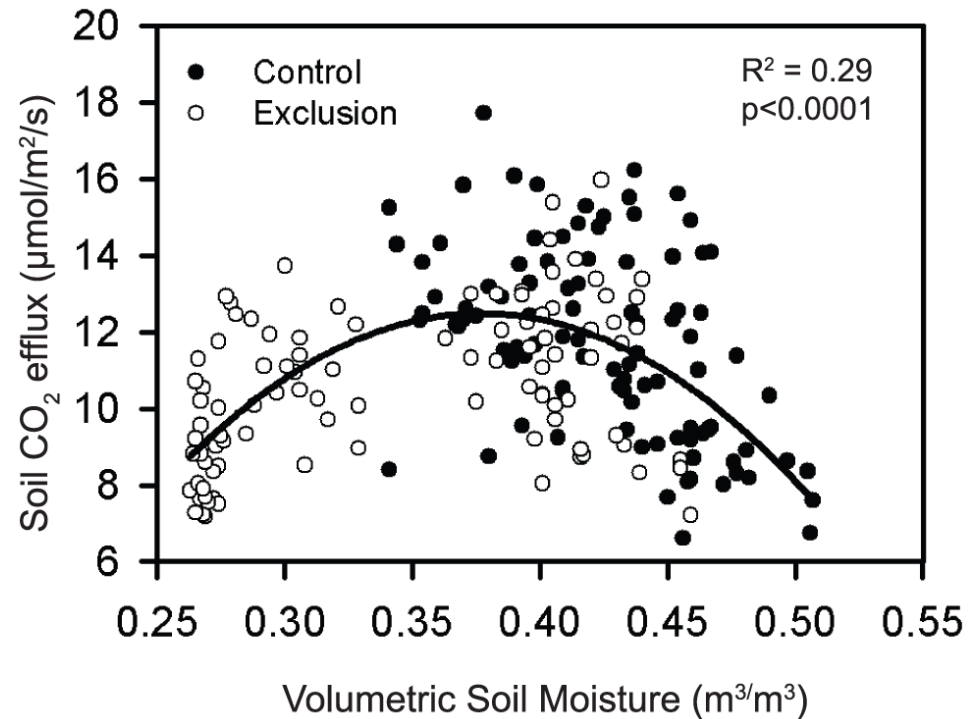


$$F_s \sim Q_{10}^{(T-T_0)/\Delta T}$$

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

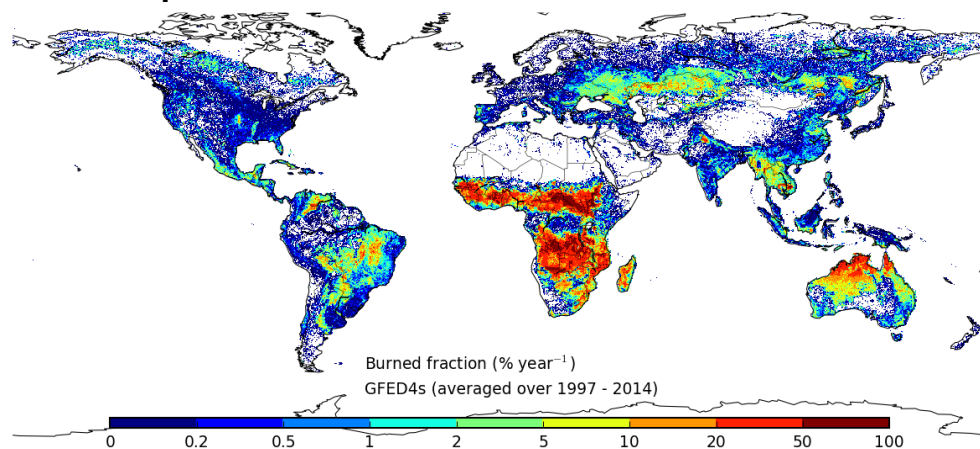
$$Q_{10} \approx 2$$

влажностное содержание w
[Wood et al., 2013]



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.

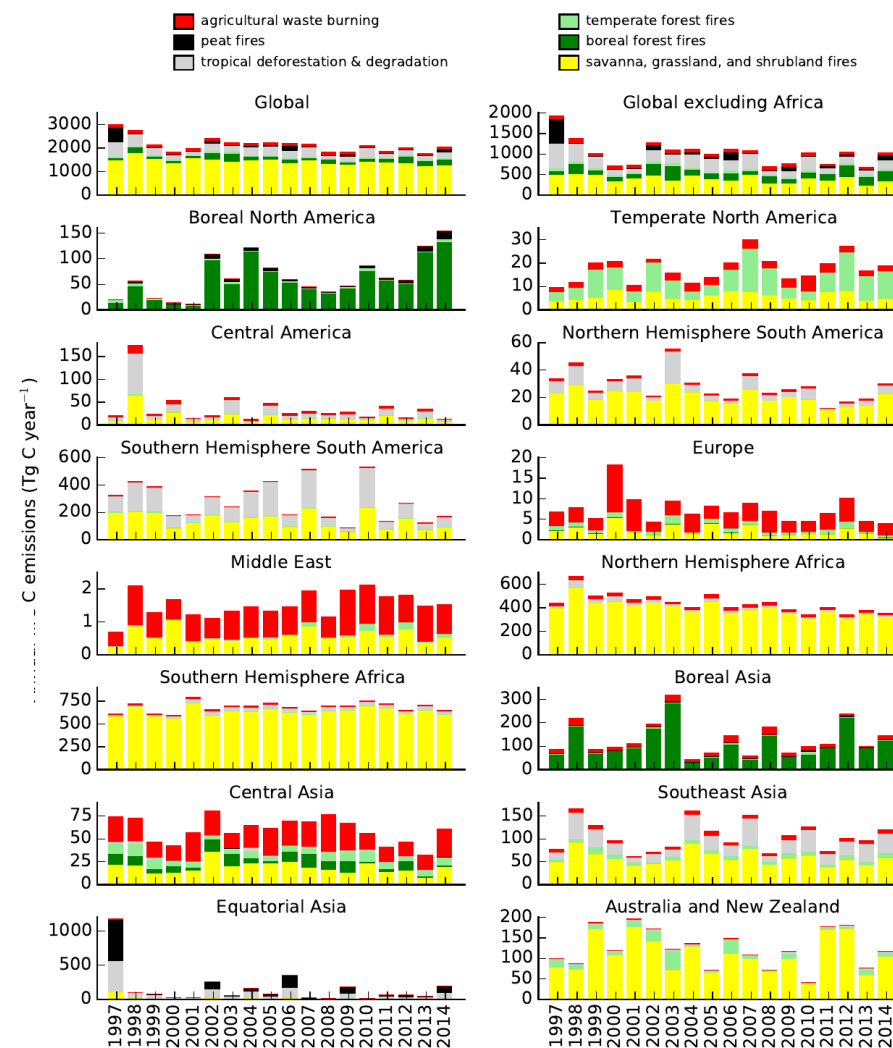
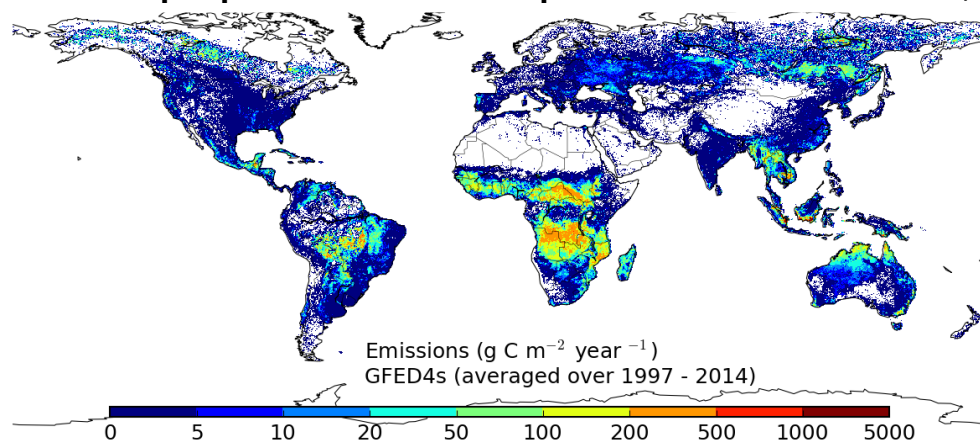


эмиссии CO_2 [$\text{gC m}^{-2} \text{год}^{-1}$]

(модель CASA-TEM),

среднее 2.0 ± 0.3 ПгС/г.,

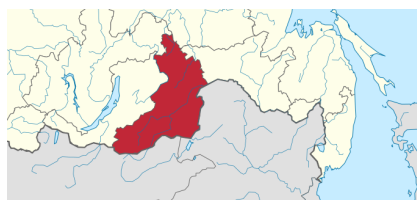
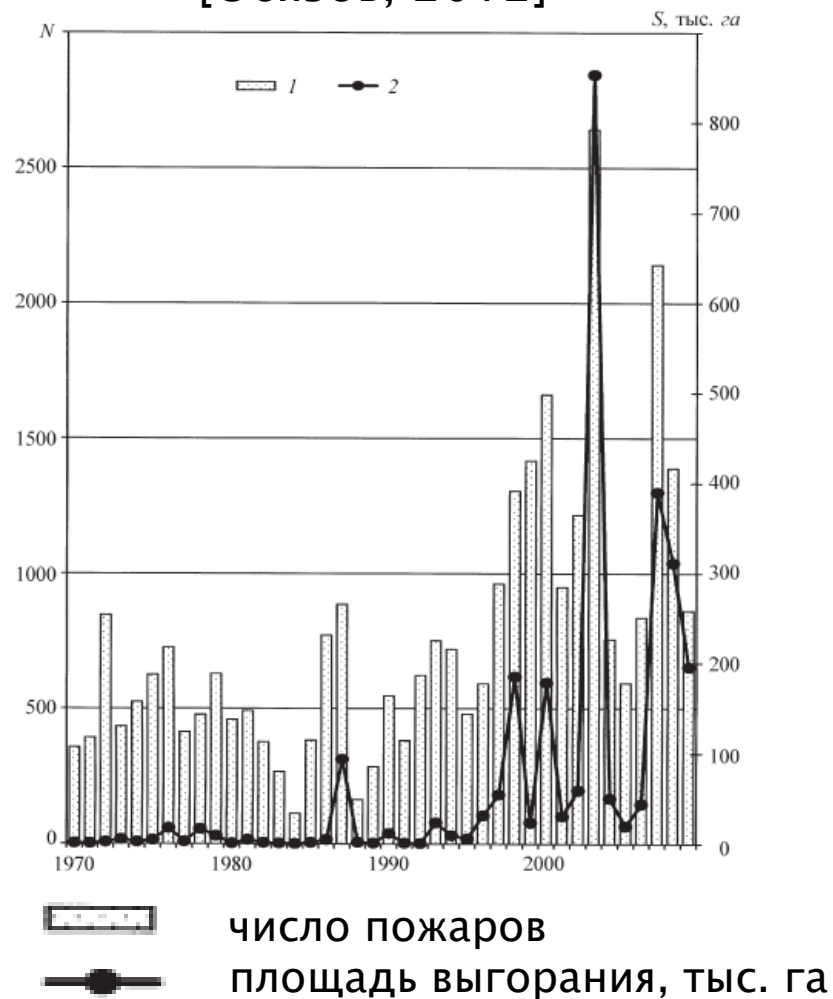
только природные пожары: 1.4 ± 0.3 ПгС/г.



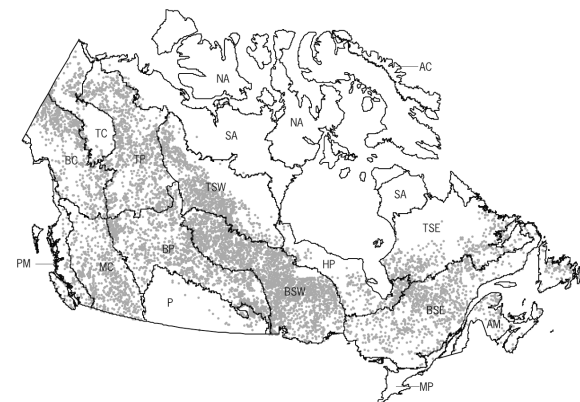
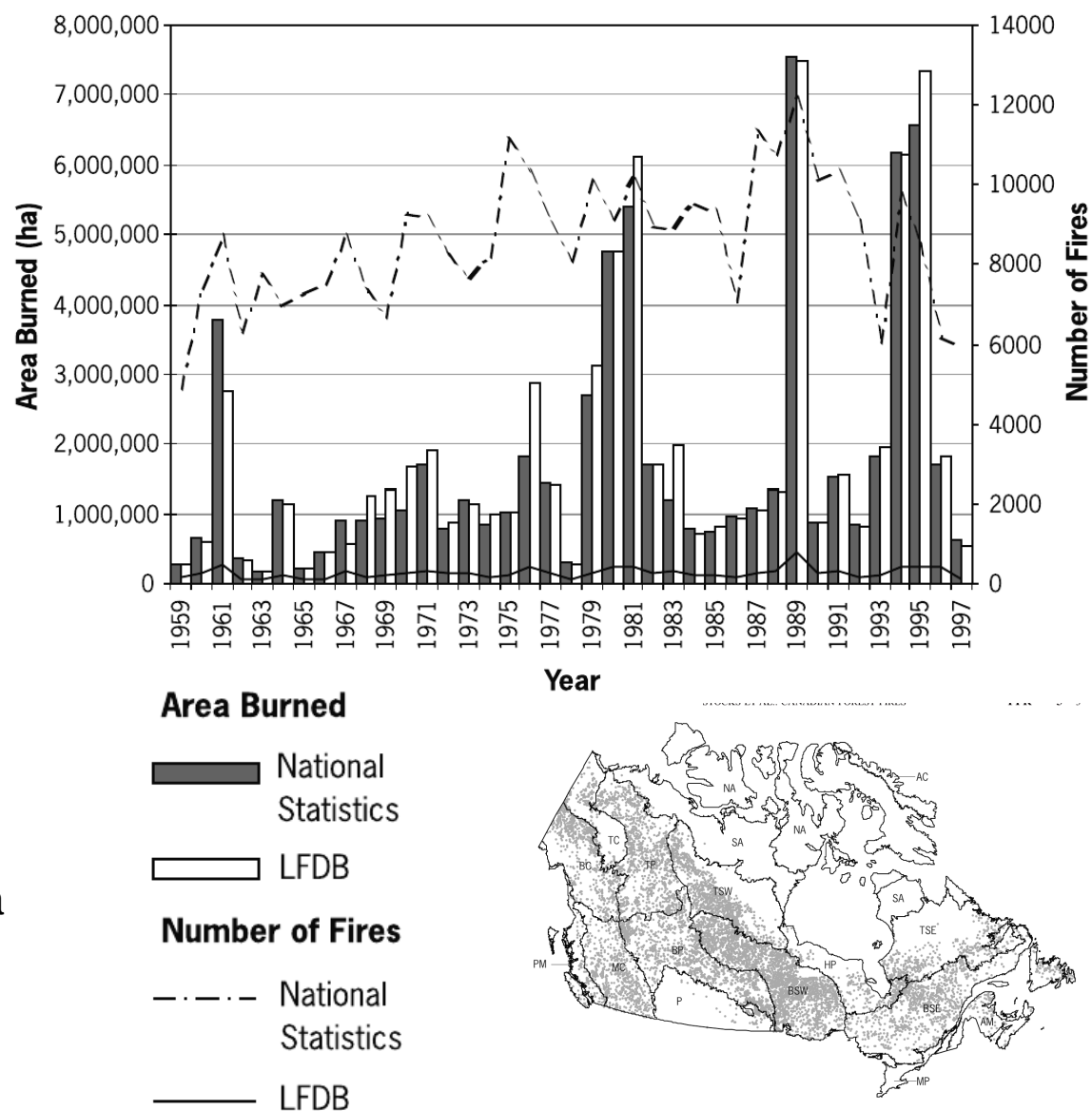
Общие сведения о глобальном углеродном цикле: наземный УЦ

Усиление активности природных пожаров в последние десятилетия

Забайкальский край,
Авиалесоохрана
[Обязов, 2012]

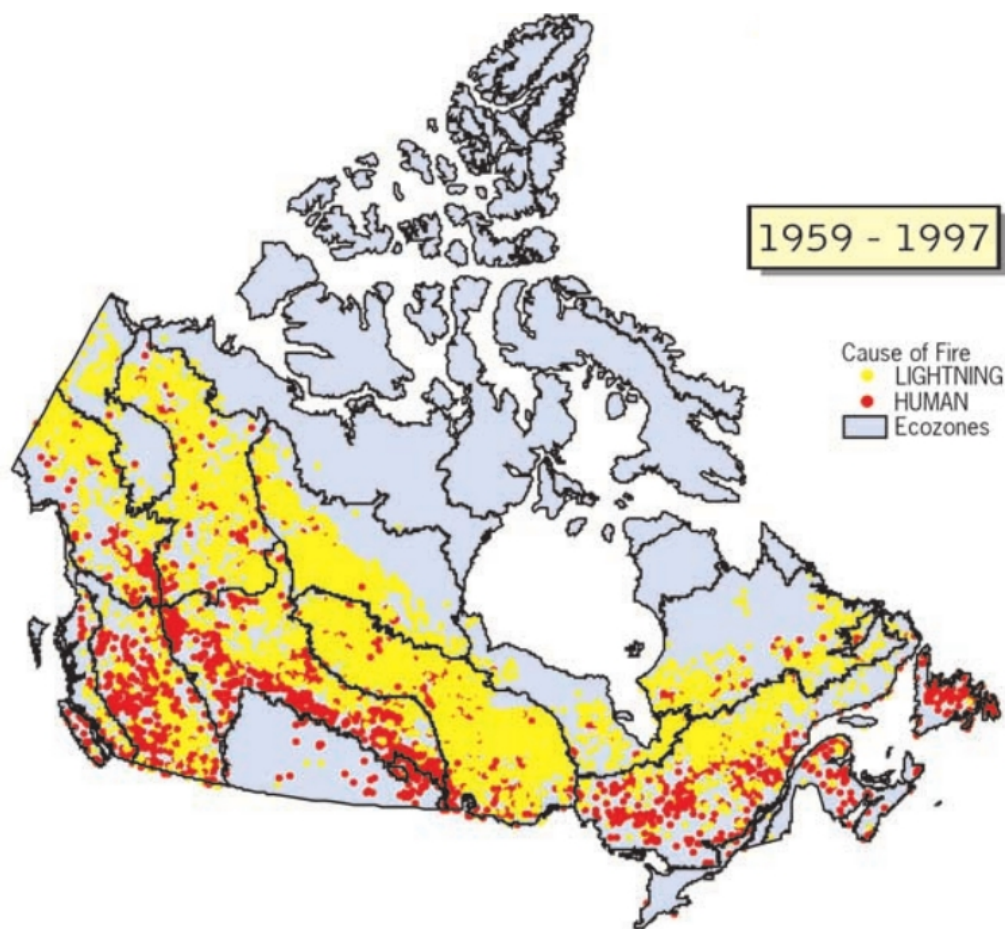


Канада [Stocks et al., 2003]

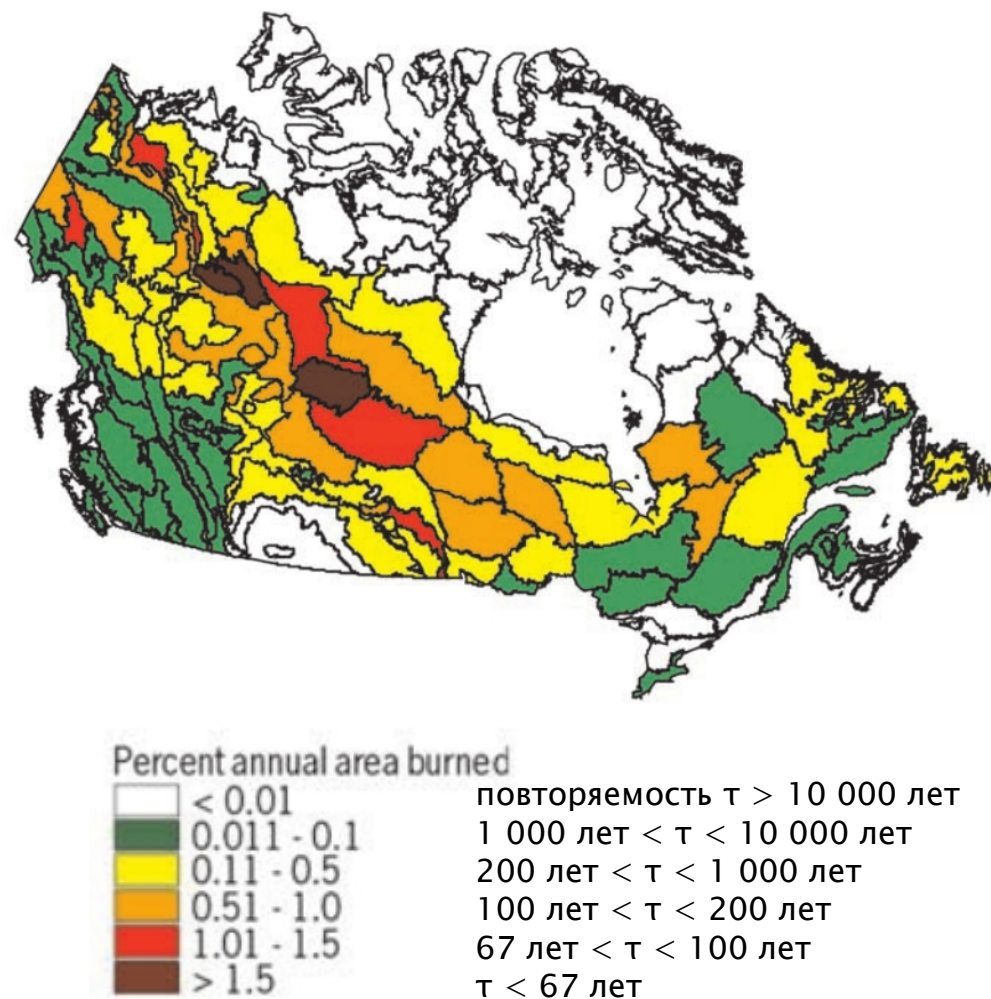


Источники возгорания для природных пожаров (Канада, LFDB [Stocks et al., 2003])

источники возгорания



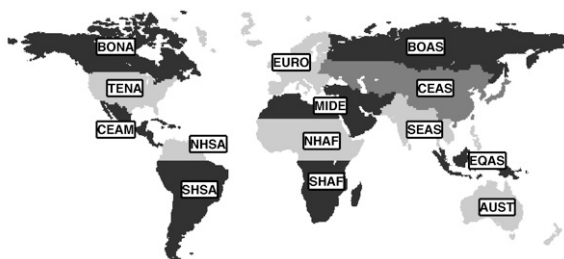
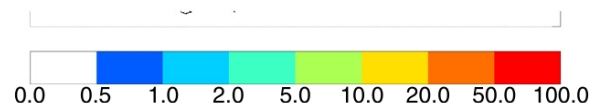
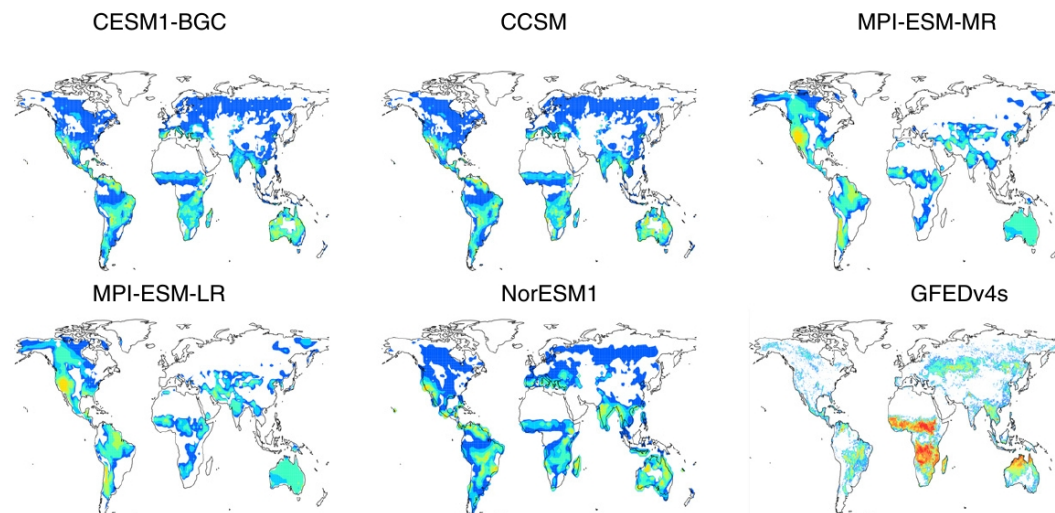
площадь выгорания



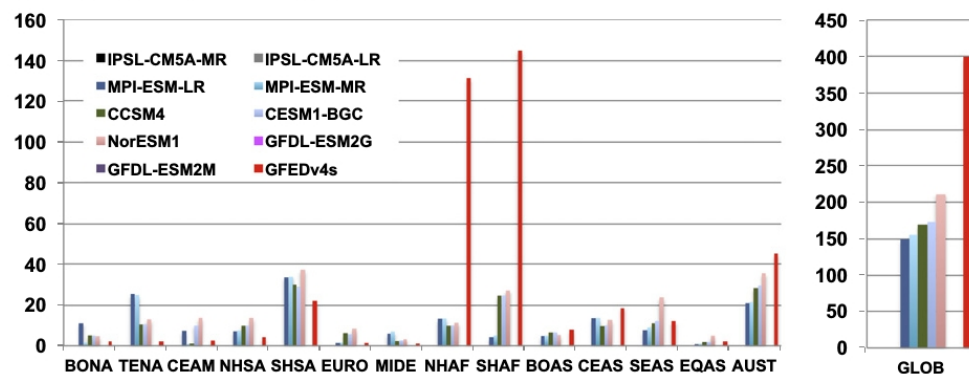
Замечание. При потеплении климата
число молниевых ударов возрастает

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

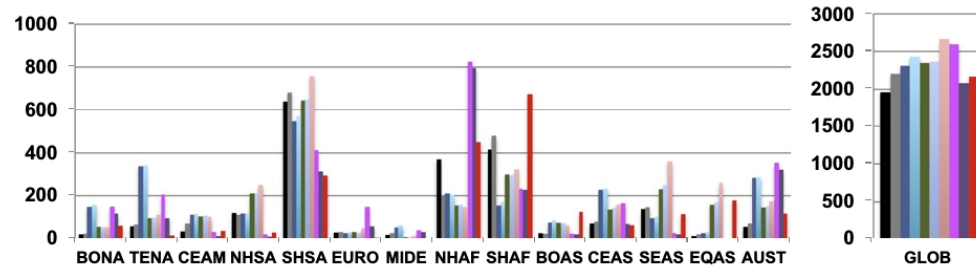
площадь выгорания [%/год]



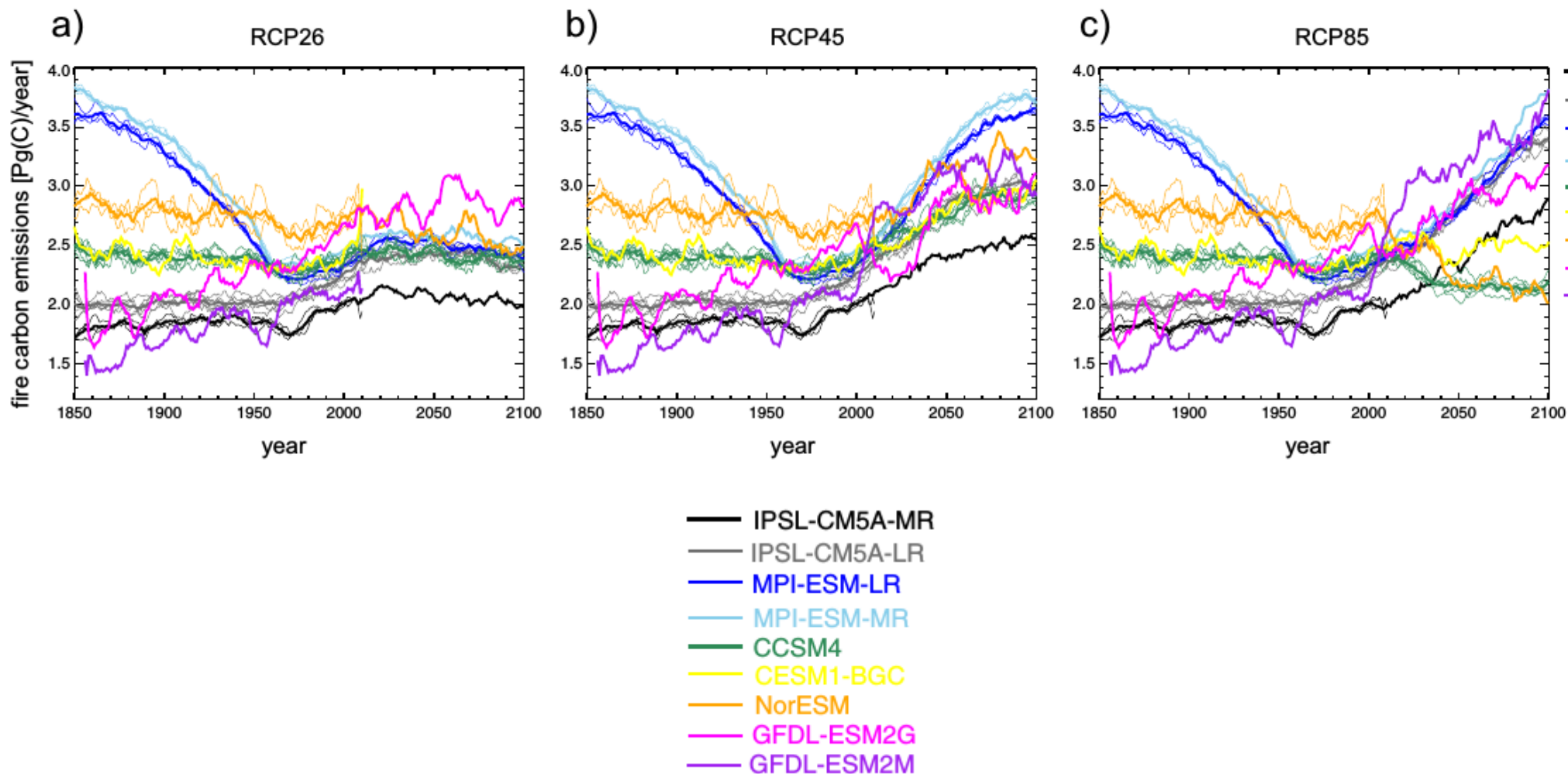
a) annual burned area [Mha]



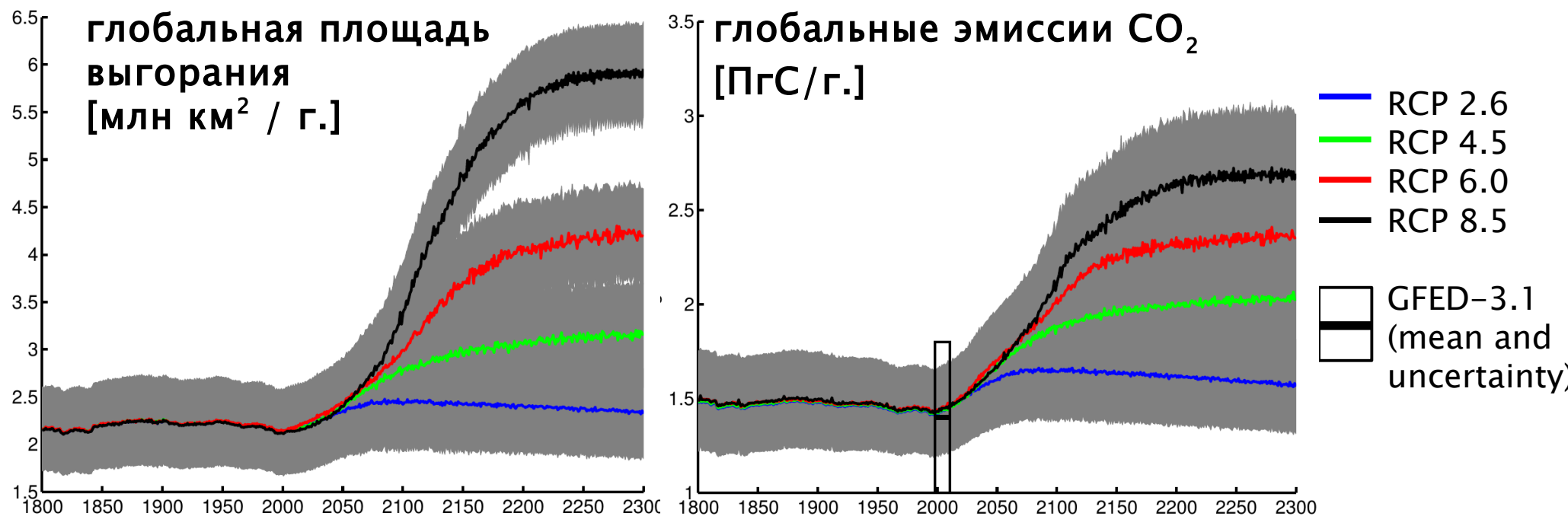
b) fire carbon emissions [TgC/year]



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



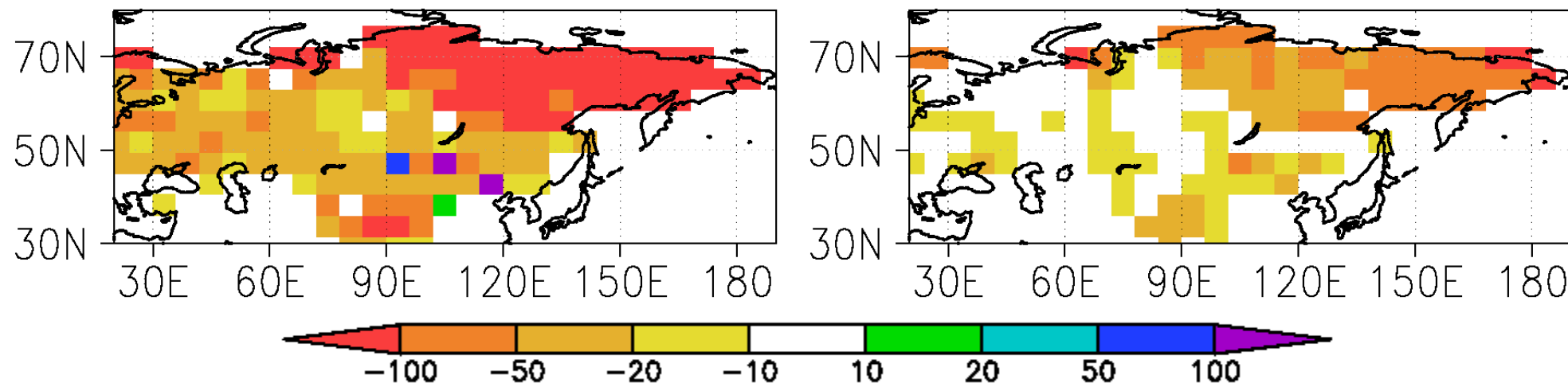
Природные пожары (КМ ИФА РАН) [Eliseev et al., 2014]



изменение частоты повторяемости пожаров [лет], RCP 6.0

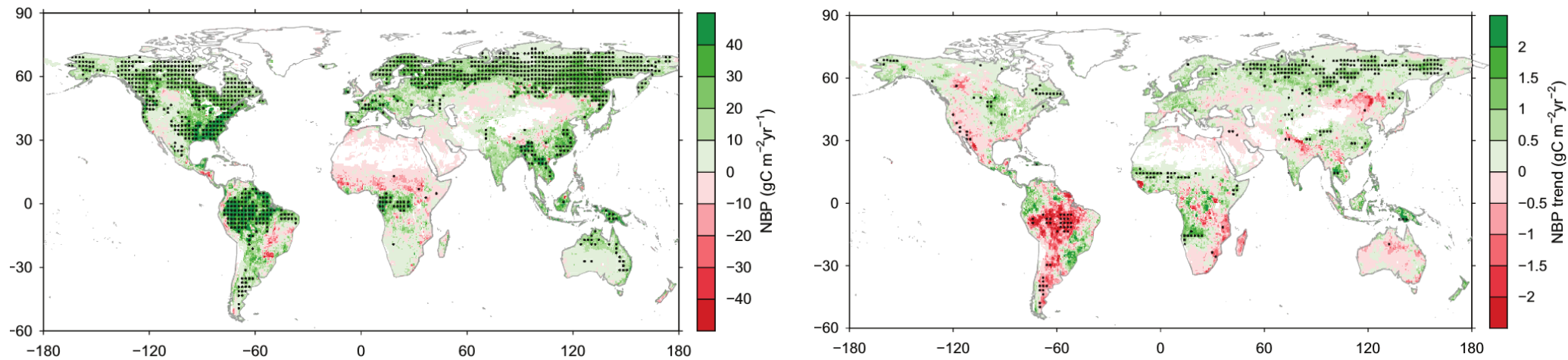
от 1997–2011 гг. к 2091–2100 гг.

от 2091–2100 гг. к 2291–2300 гг.



Поток CO_2 между атмосферой и наземными экосистемами

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



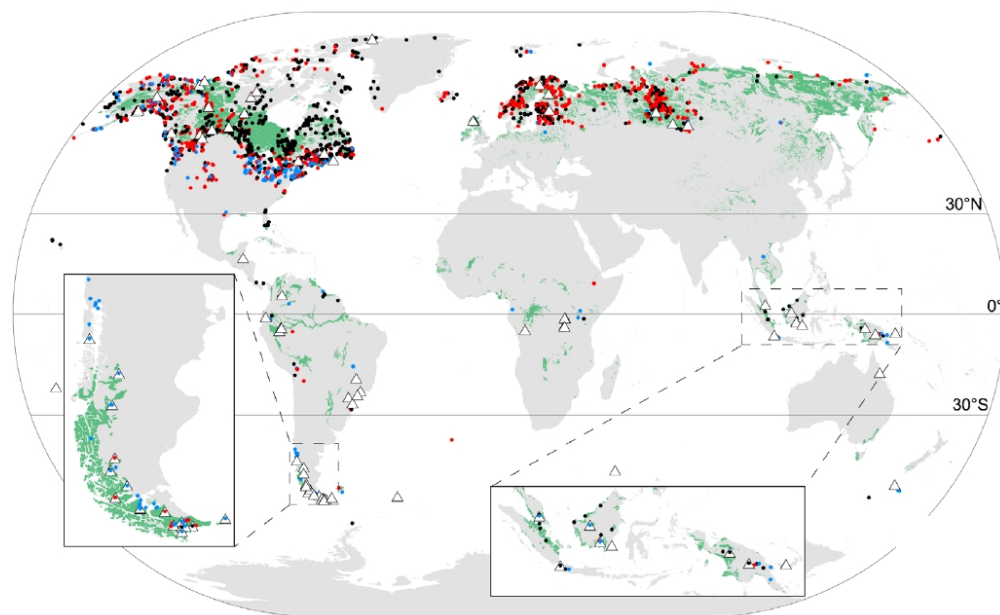
Поглощение CO_2 наземными экосистемами [Le Quere et al., 2013]

	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

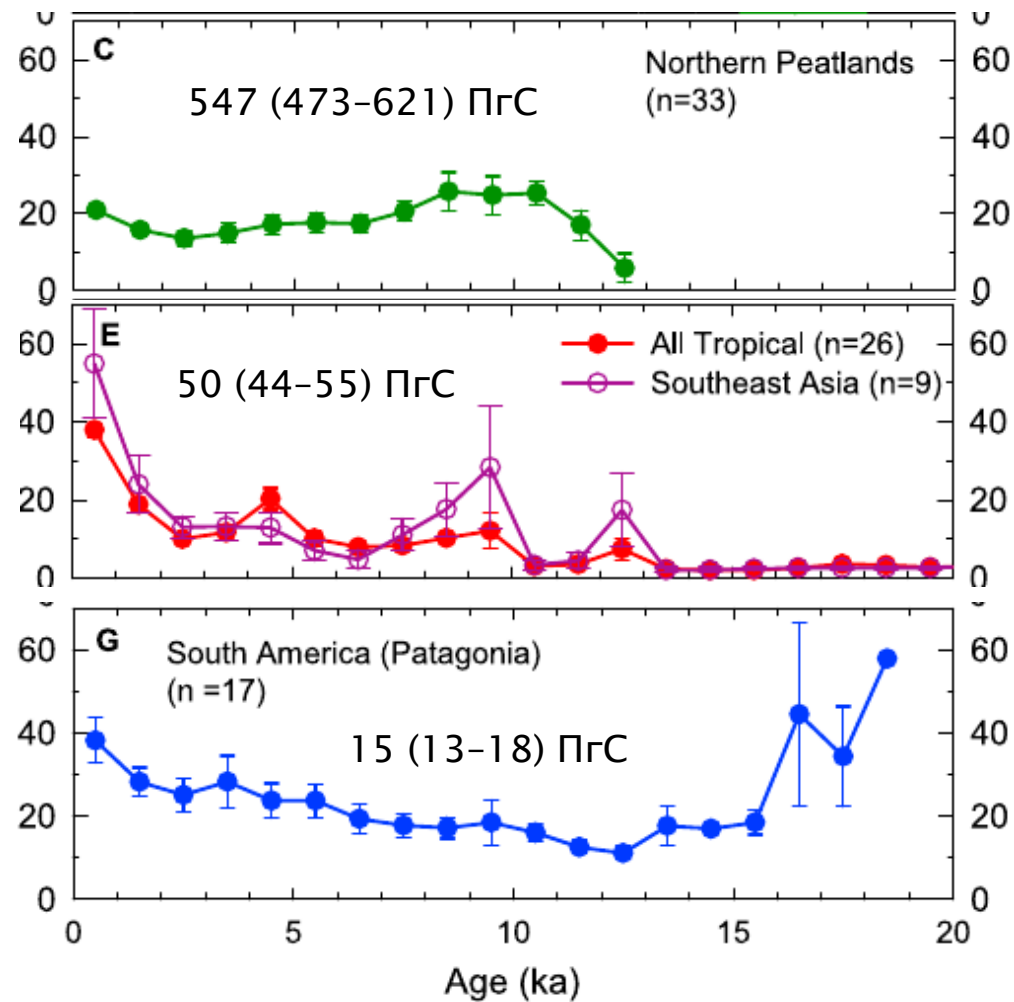
В 1750–2011 гг. наземные экосистемы поглотили 160 ± 90 ПгС [IPCC, 2013]

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

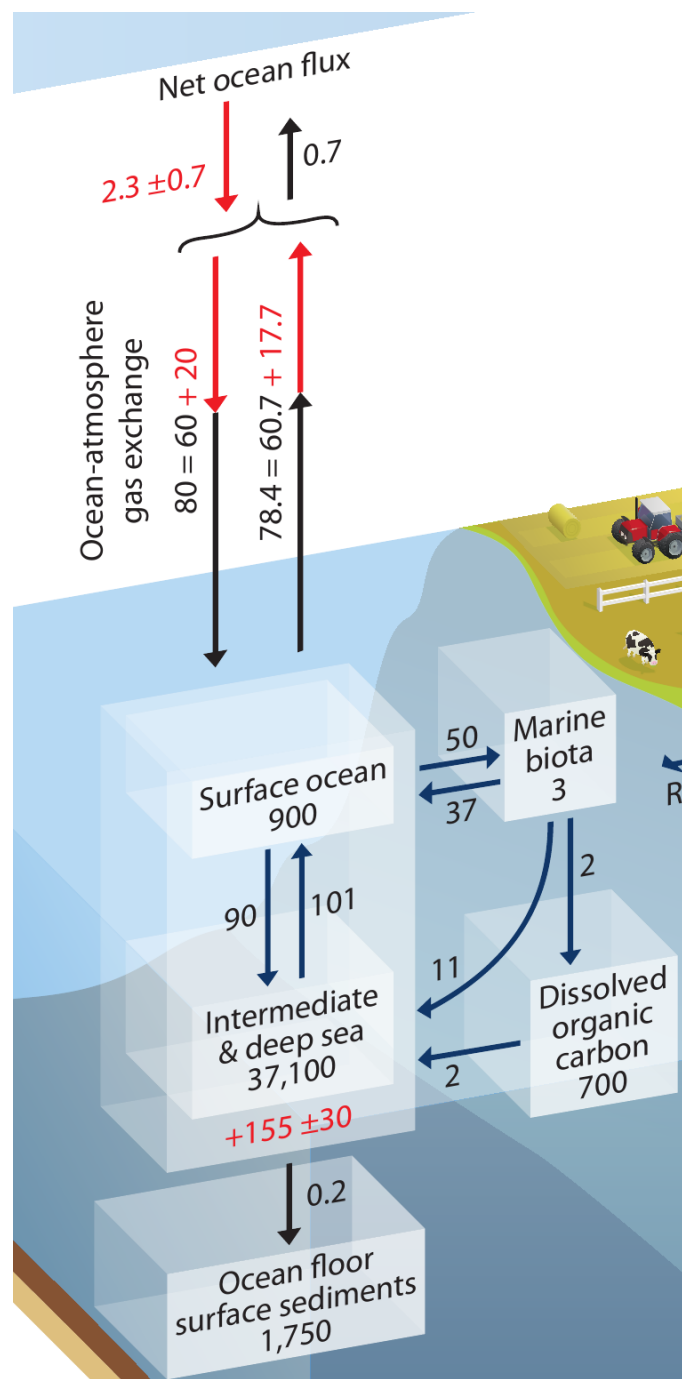
возраст торфа у основания



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 CO₂ океаном (1)

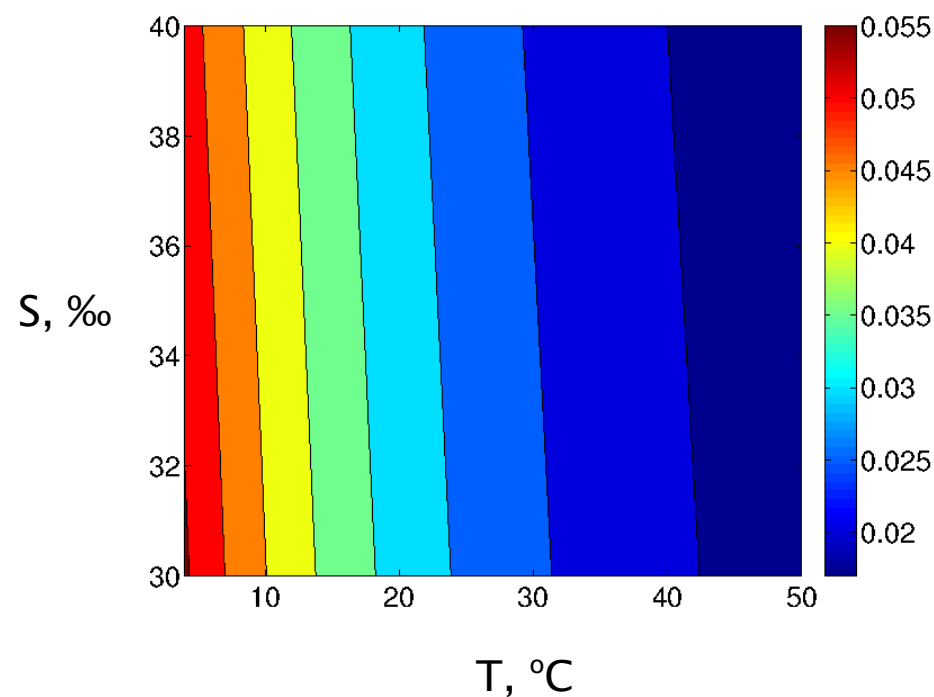
Поток CO₂ на единицу площади:

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

- k – коэффициент газообмена (зависит от скорости ветра),
- α – растворимость CO₂ в морской воде ($\approx 1.45 \text{ кгCO}_2/\text{м}^3$),
- $p\text{CO}_{2,\{a,o\}}$ – парциальное давление CO₂

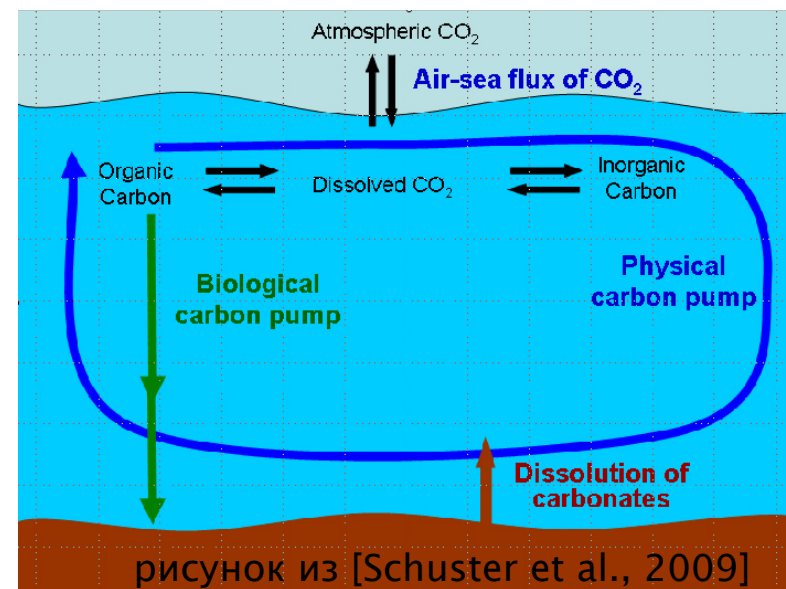
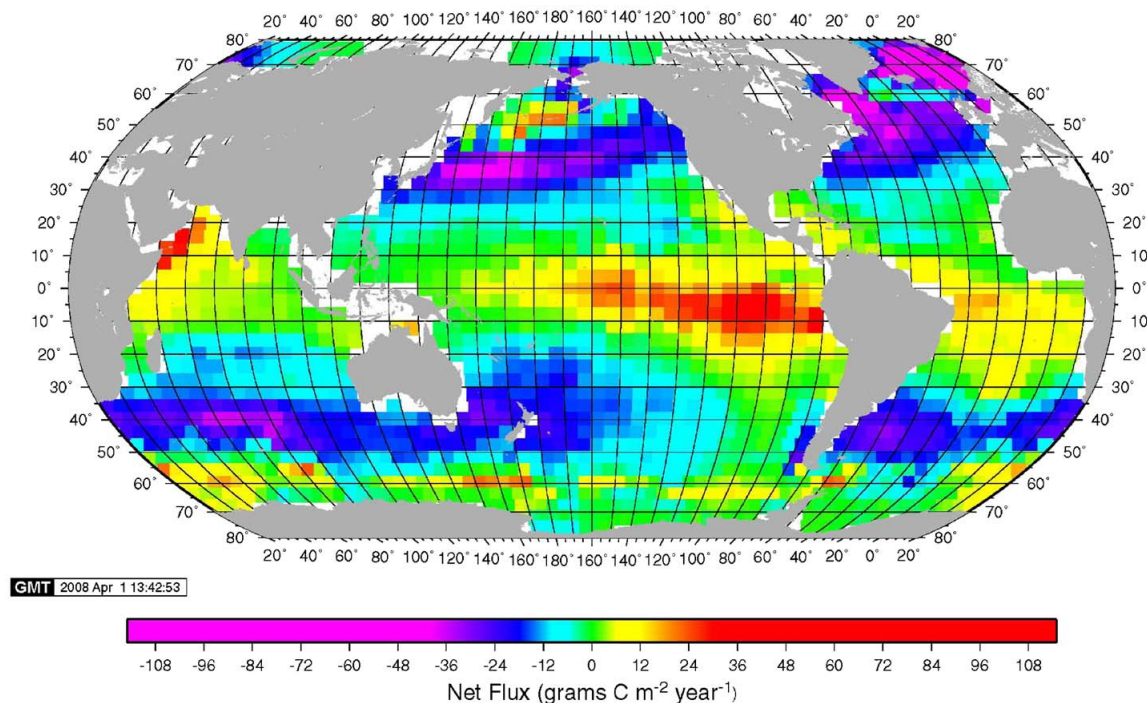
$$F_o \approx 2 \text{ ПгС/год} \Leftrightarrow (p\text{CO}_{2,a} - p\text{CO}_{2,o}) = 6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}.$$

Растворимость CO₂ в морской воде
[моль кг⁻¹ 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 (1)

процесс	химическое уравнение	балансовое уравнение
растворение в воде	$\text{CO}_2 (\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2 (\text{aq})$	$p\text{CO}_{2,\text{o}} = [\text{CO}_2 (\text{aq})] / \alpha$
разложение на водород и ион бикарбоната	$\text{CO}_2 (\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	$[\text{H}^+] [\text{HCO}_3^-] = K_1 [\text{CO}_2]$
разложение на водород и ион карбоната	$\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$[\text{H}^+]^2 [\text{CO}_3^{2-}] = K_2 [\text{CO}_2]$
диссоциация воды	$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$	$[\text{H}^+] [\text{OH}^-] = K_w$
диссоциация боратов	$\text{H}_2\text{OB}(\text{OH}_3) \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{B}(\text{OH})_4^-$	$[\text{H}^+] [\text{B}(\text{OH})_4^-] = K_B$
образование карбоната кальция (кальцитов/арагонитов)	$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3 (\text{s})$	

Полное содержание неорганического CO_2 в океане:

$$\text{TCO}_2 = [\text{CO}_2^*] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}],$$

$$\text{где } [\text{CO}_2^*] = [\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{CO}_3]$$

Щёлочность:

$$A = 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] + [\text{B}(\text{OH})_4^-] - [\text{H}^+] = \text{const}$$

Карбонатный цикл океана (2)

буферный фактор

– в интегральной форме

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

– в дифференциальной форме

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

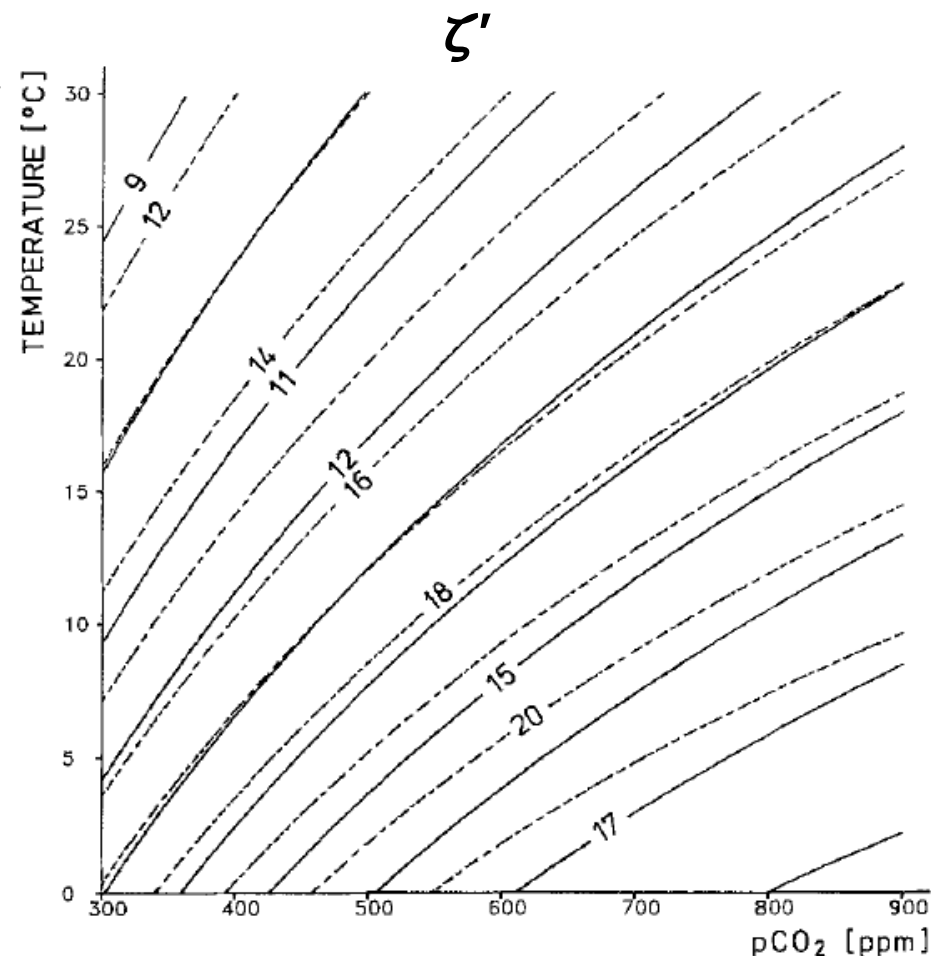
($C = \text{TCO}_2$,

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

Справедливо

$$\zeta > 1,$$

$$\zeta' > 1.$$



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:

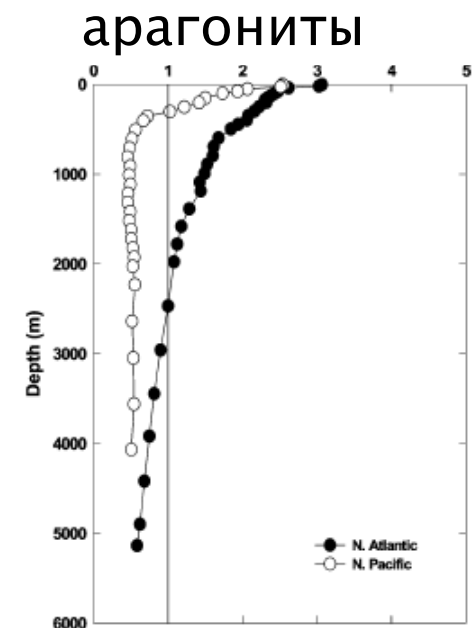
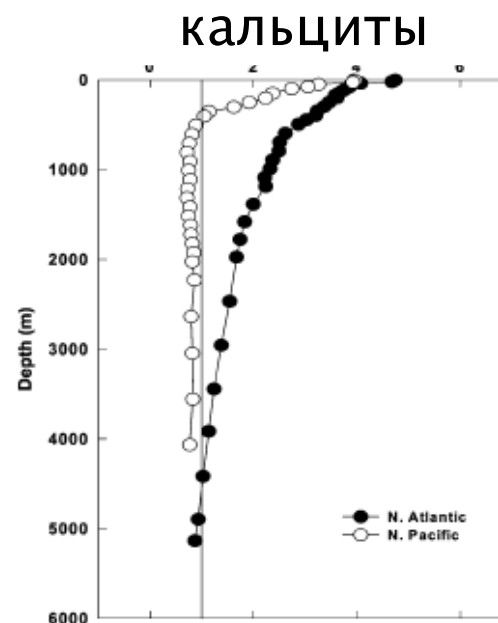
Характеристика насыщенности

$$\Omega = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] / K_{\text{sp}}^*.$$

– в верхнем слое океана поверхности $\Omega > 1 \Rightarrow$ карбонат кальция не растворяется;

– в глубоком океане $\Omega < 1 \Rightarrow$ карбонат кальция растворяется;

– глубина с $\Omega = 1$ называется **глубиной насыщения**.



Эффект закисления океана.

Закисление океана – увеличение $\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$.

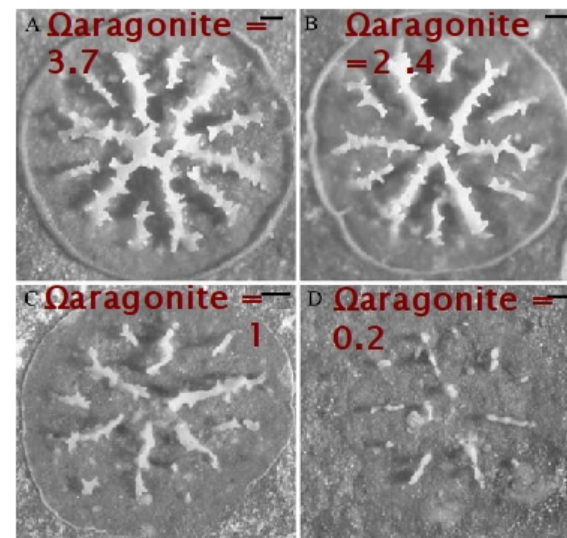
– сдвигает равновесие карбонатного цикла в сторону $\text{CO}_2(\text{aq}) \Rightarrow$ уменьшает поглощение CO_2 океаном из атмосферы.

– уменьшает глубину насыщения для карбоната кальция \Rightarrow сдвигает равновесие карбонатного цикла в сторону $\text{CaCO}_3 \Rightarrow$ увеличивает поглощение CO_2 океаном из атмосферы. Поглощение CO_2 океаном уже уменьшило глубину насыщения на 500 м. К концу XXI века даже у поверхности для арагонитов возможно $\Omega < 1$. Этот эффект увеличивает ёмкость океана к поглощению CO_2 .

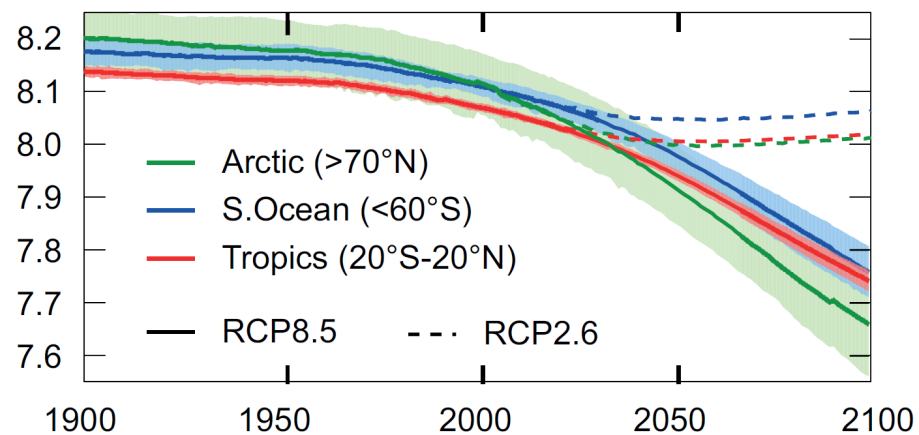
(приводит к гибели моллюсков и кораллов).

Суммарный эффект неясен.

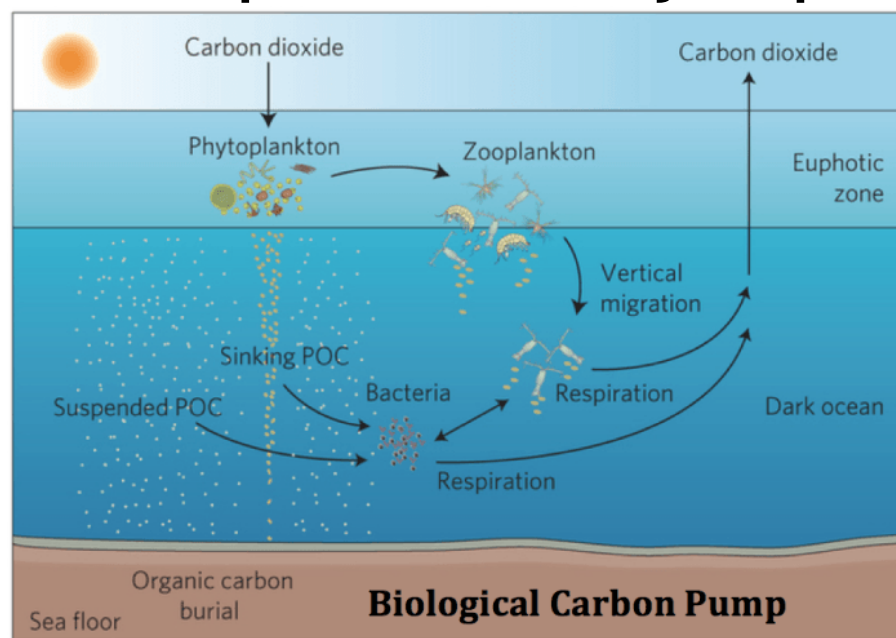
Растворение моллюска в кислой среде [Cohen et al., 2009]



Изменение pH верхнего слоя океана [IPCC, 2013]



Органический углеродный цикл океана: планктон



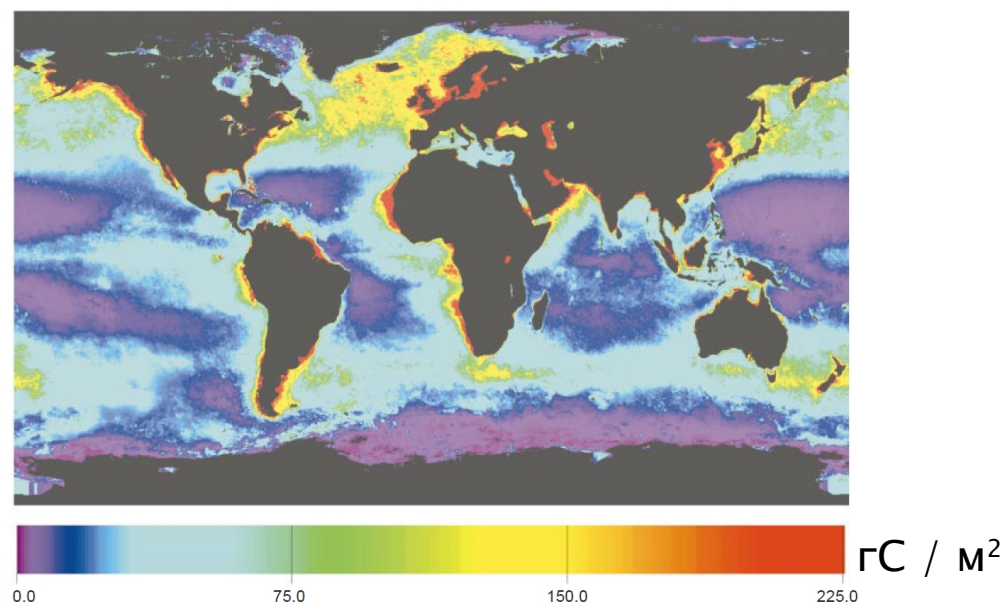
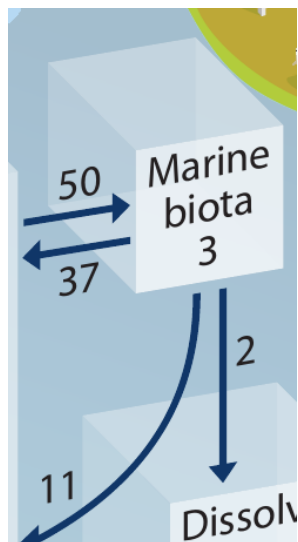
<http://moocs.southampton.ac.uk>

$NPP_{oc} \approx 45 \text{ ПгС/год};$

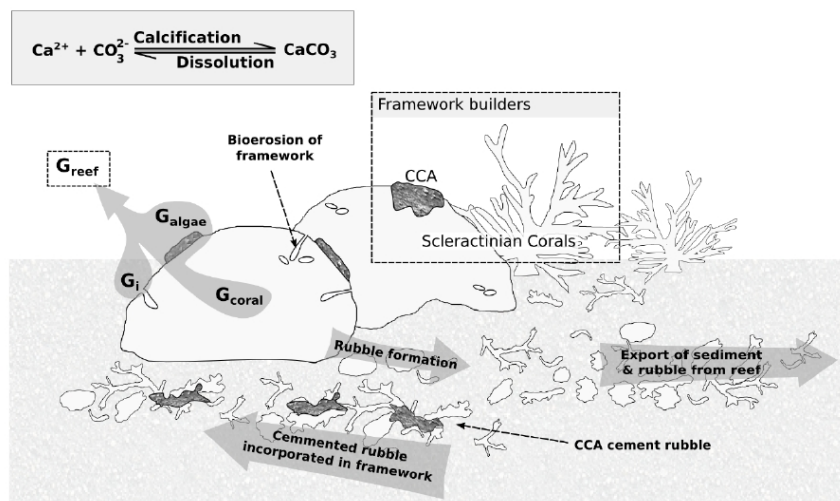
в моделях NPP_{oc} равен 44–57 ПгС/год
[Carr et al., 2006].

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

[IPCC AR5]

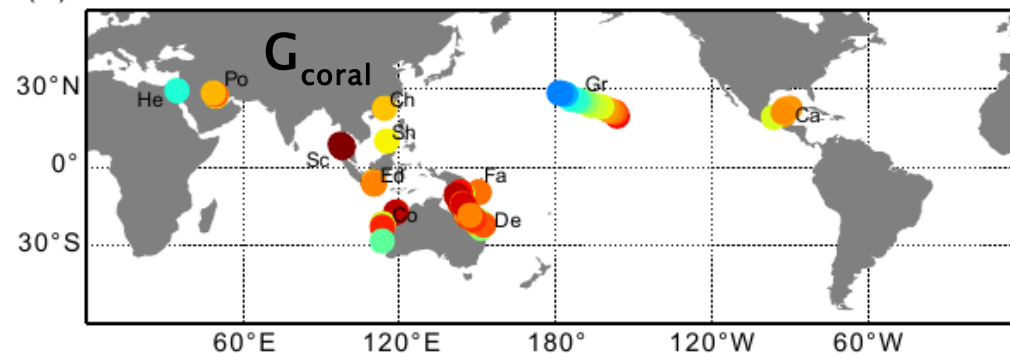


Органический углеродный цикл океана: кораллы [Jones et al., 2015]

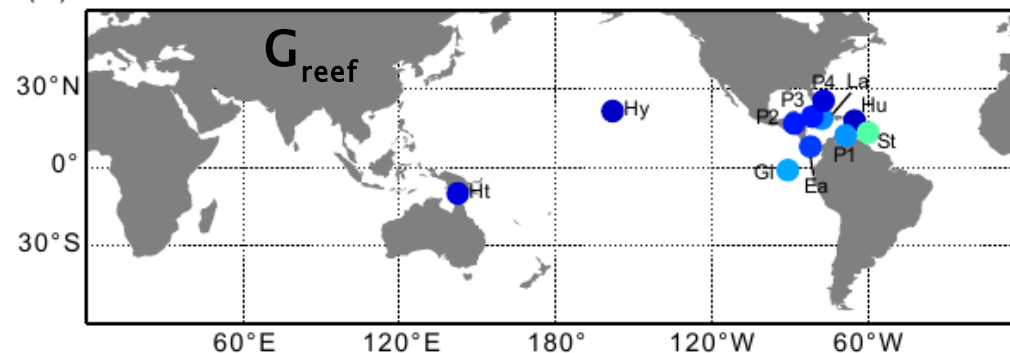


глобально:
0.08–0.10 ПгС/год
[Vecsei, 2004]

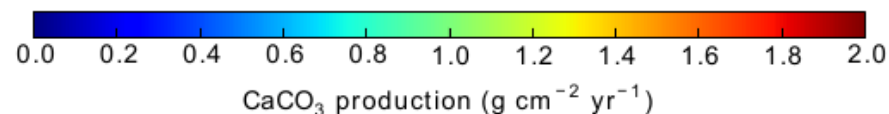
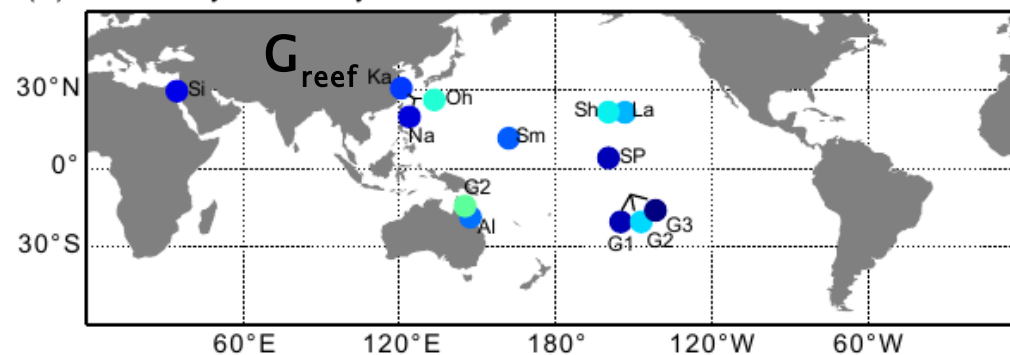
(a) Coral Cores



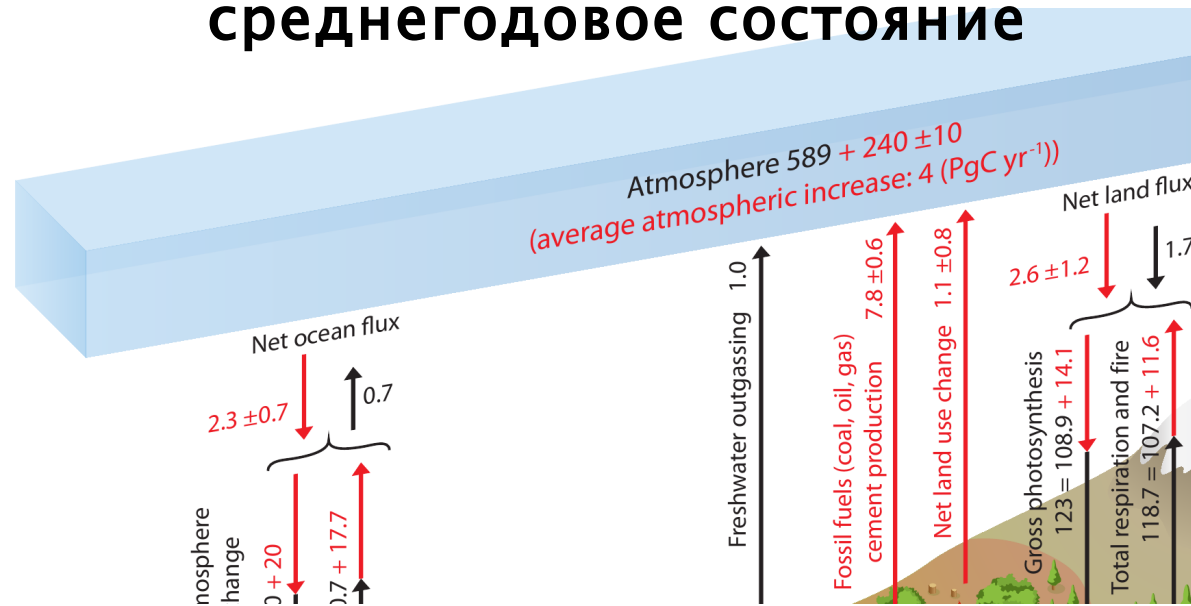
(b) Census



(c) Alkalinity anomaly



Атмосфера: современное и доиндустриальное среднегодовое состояние



Время жизни CO_2 в атмосфере $\sim 100\text{--}140$ лет

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

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

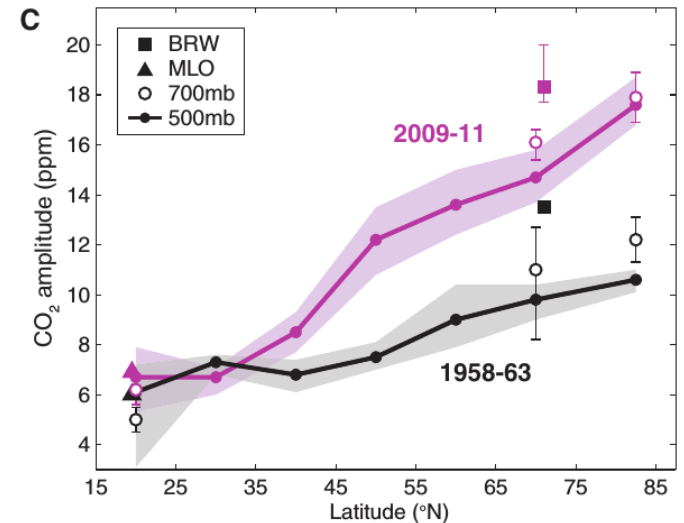
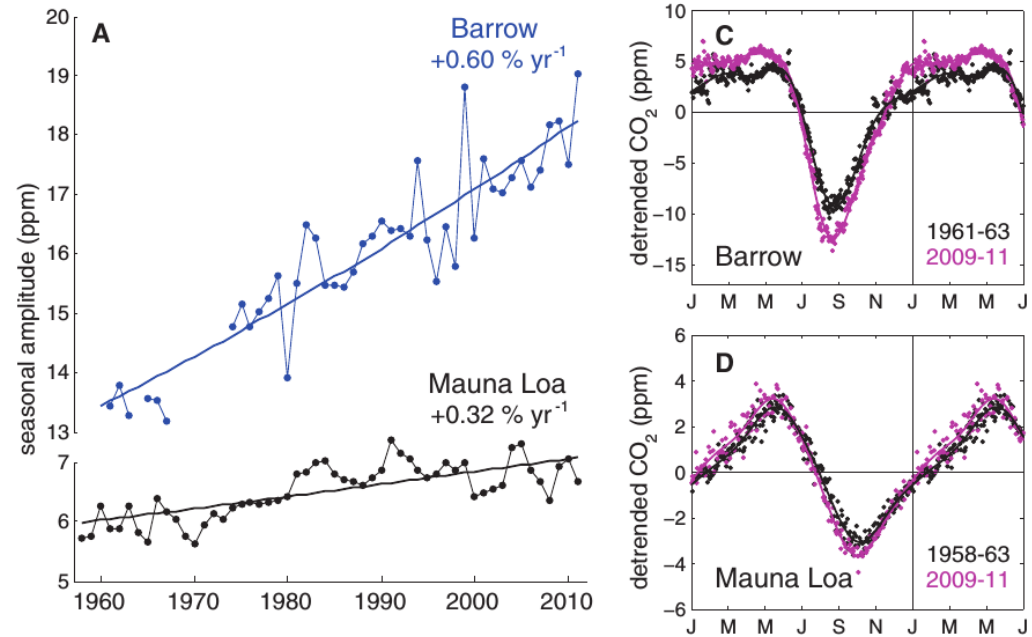
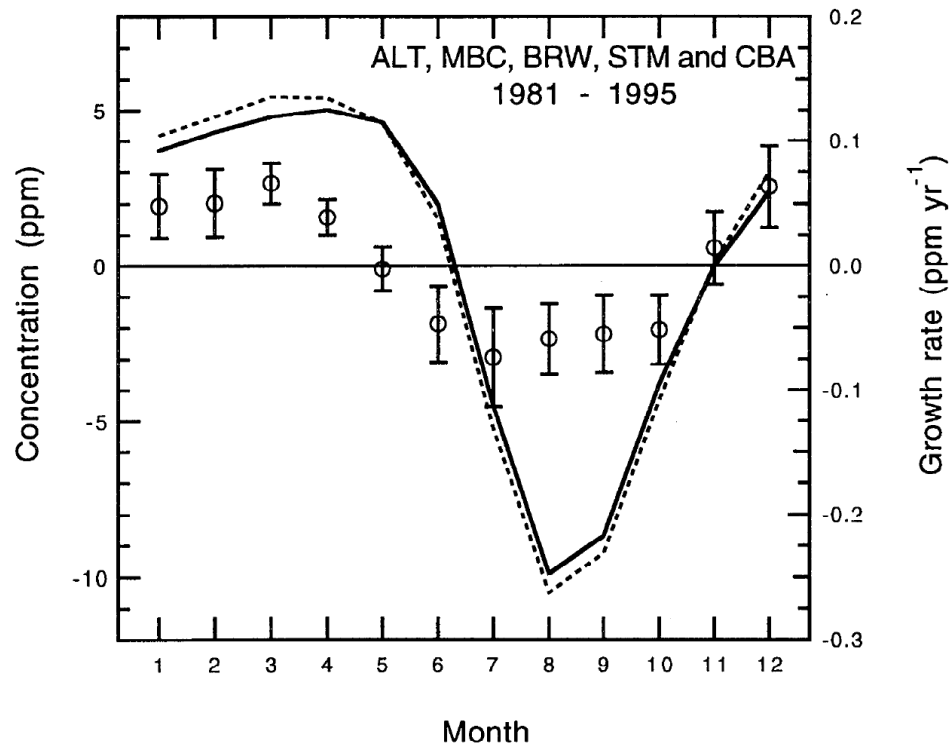
$$c_0 = 2.123 \text{ ПгС/млн}^{-1},$$

E – внешние (в том числе антропогенные) эмиссии

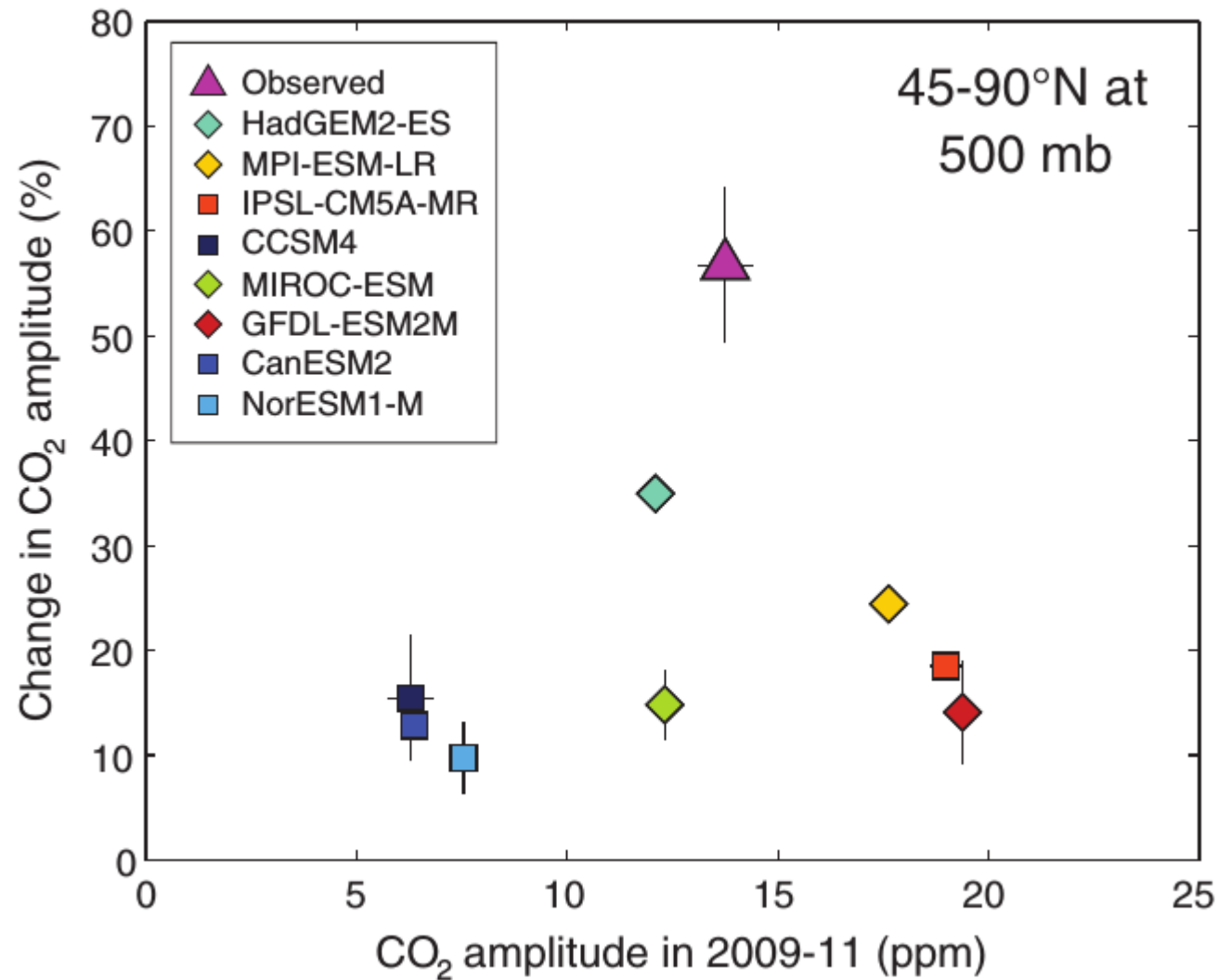
Годовой ход q_{CO_2} по наблюдениям

[Graven et al., 2013]

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

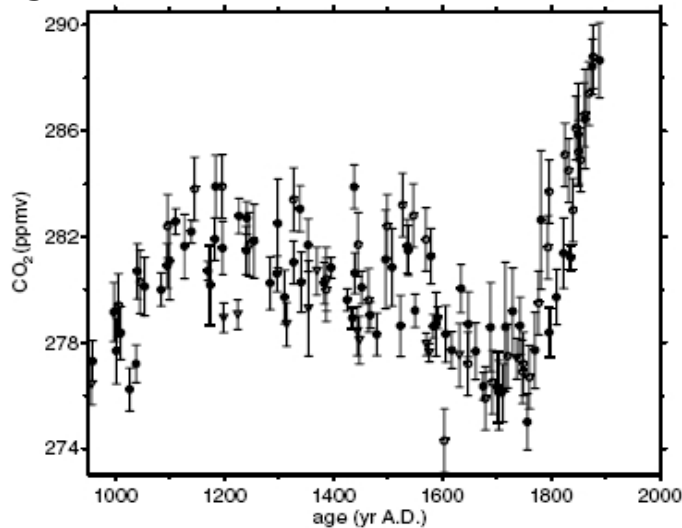


Годовой ход q_{CO_2} в моделях земной системы [Graven et al., 2013]

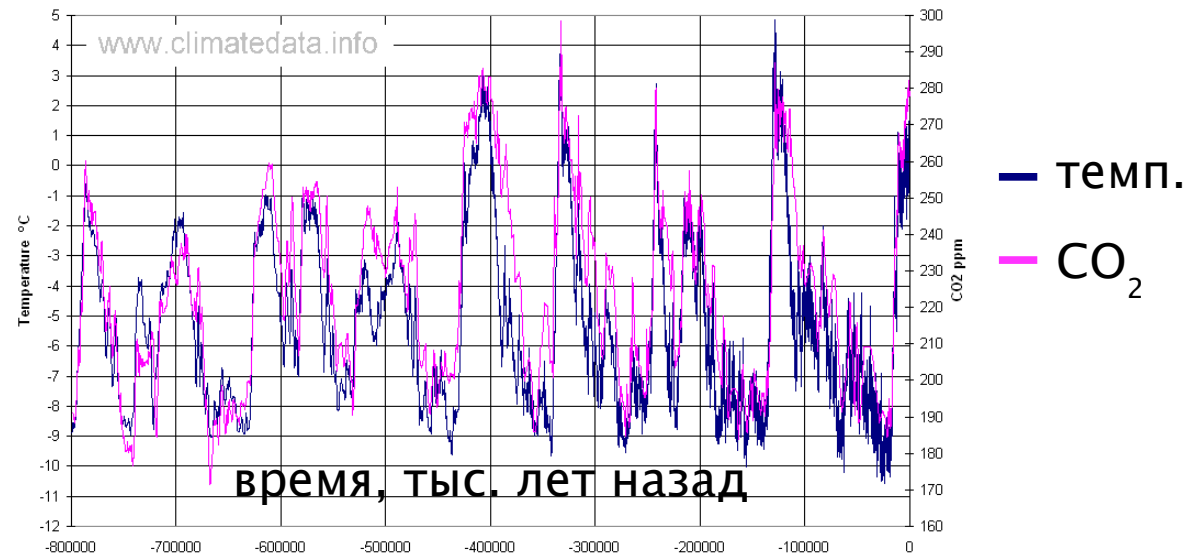


Изменение p_{CO_2} в палеоэпохи

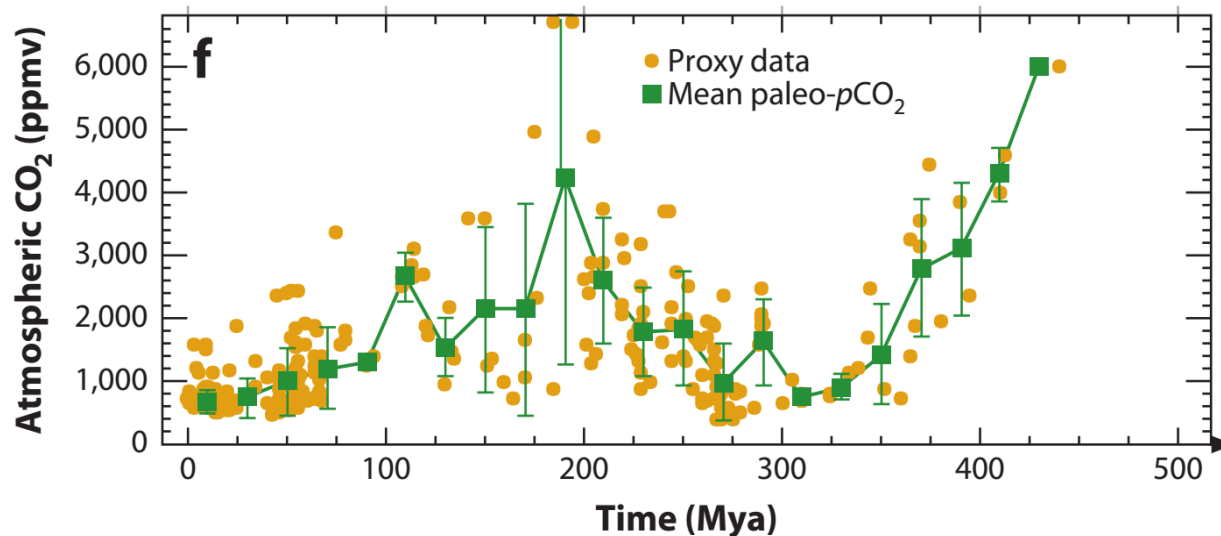
данные бурения на станциях Дроннинг
Мод Лэнд и Южный полюс (обе –
Антарктика) и Лоу Доум (Гренландия)
[Siegenthaler et al., 2005]



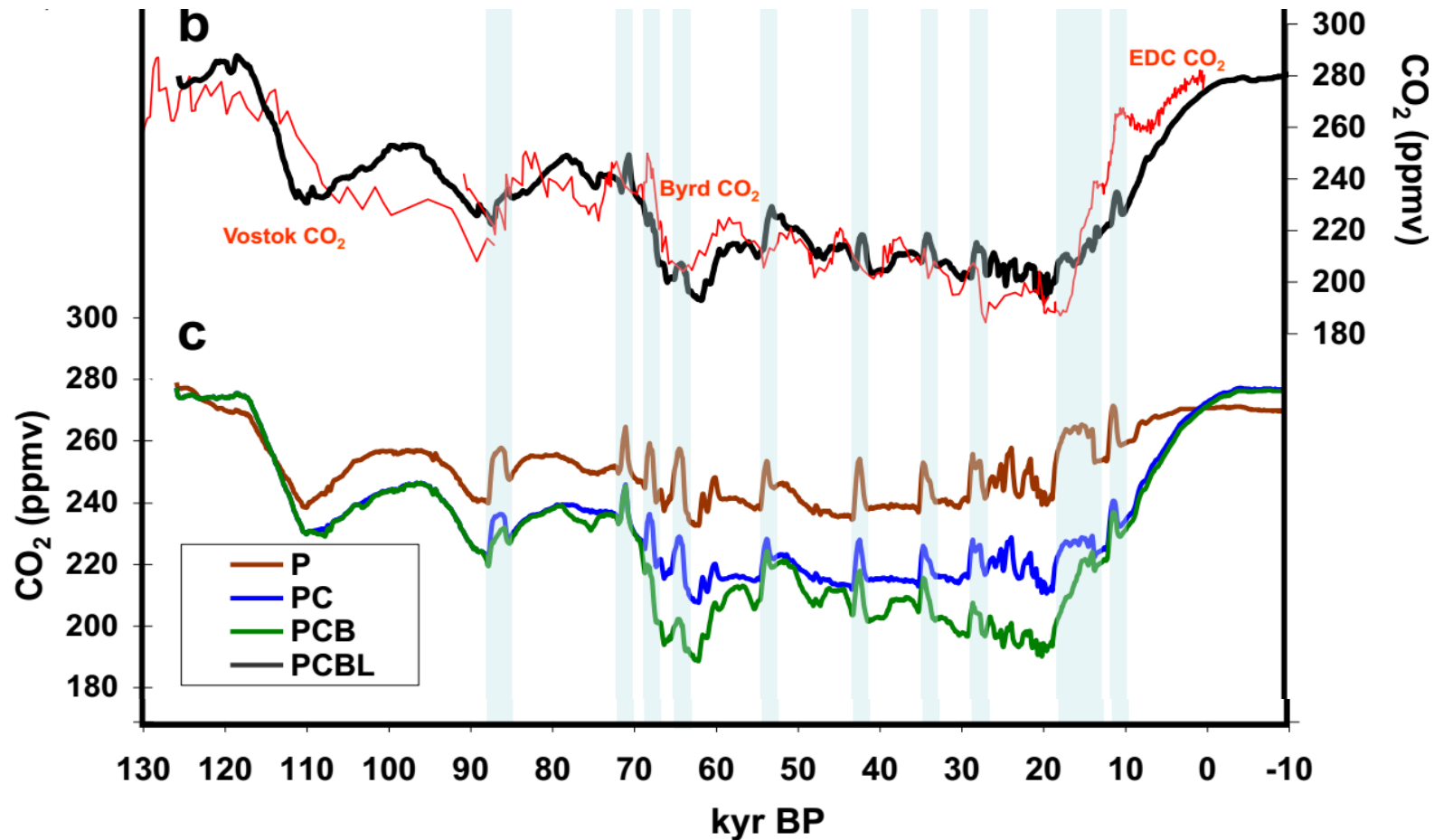
Температура и p_{CO_2} по
данным бурения на станции
Эпика (Антарктика)



обобщение палеорекоonstrukций [Zeebe, 2012]

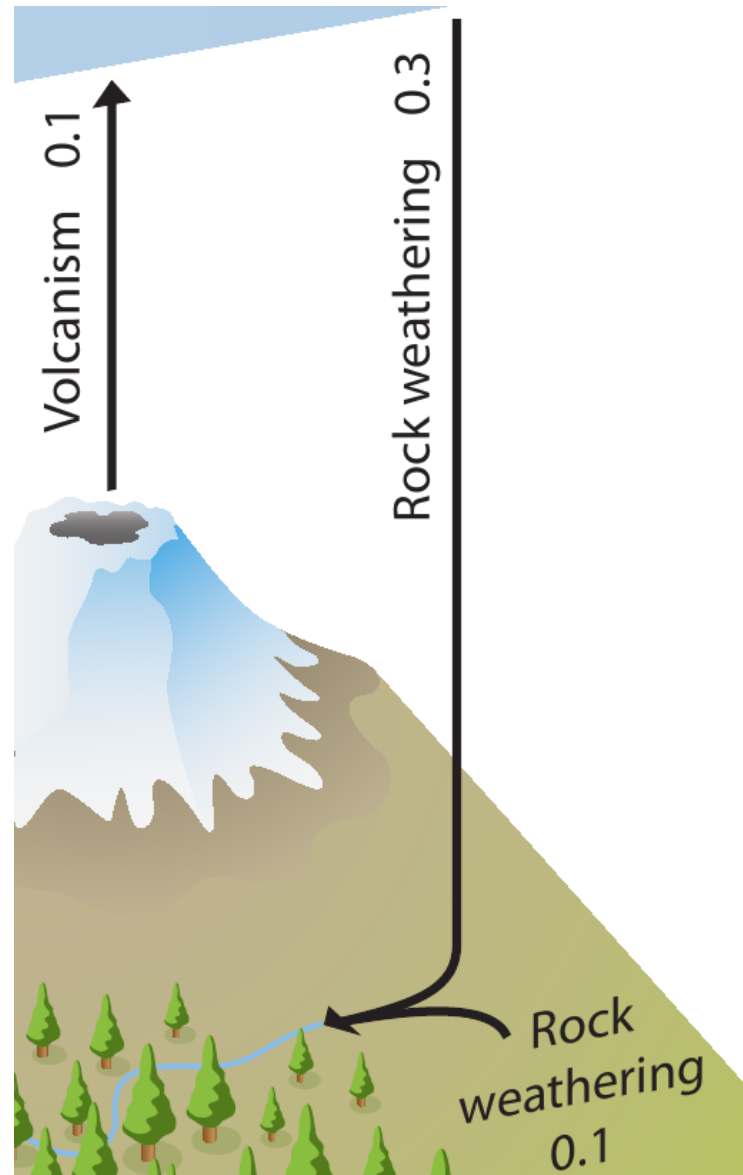


Воспроизведение q_{CO_2} для последнего ледникового цикла (Climber-2) [Brovkin et al., 2012]

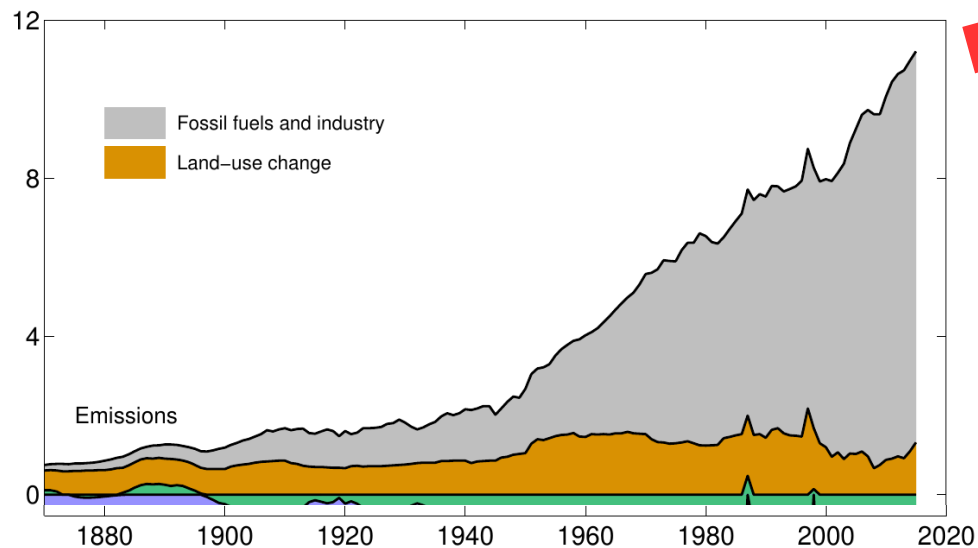
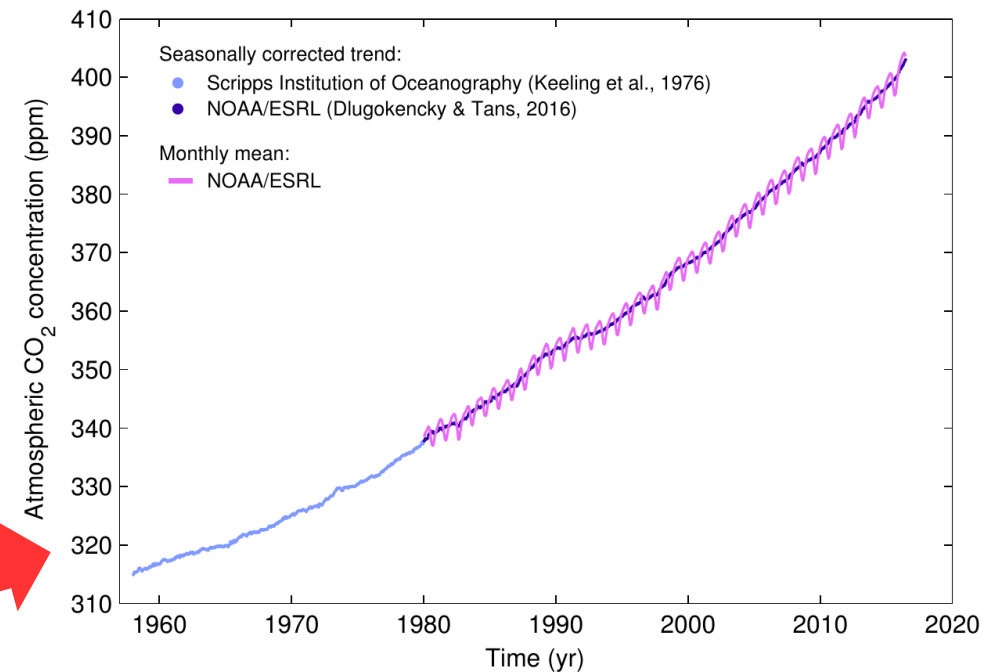
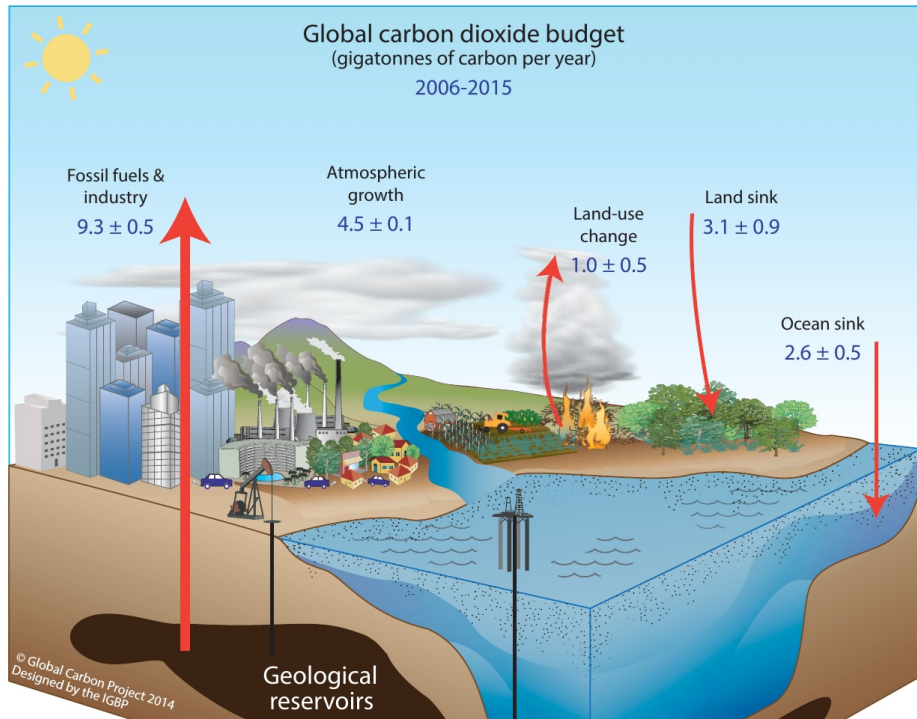


- P: изменение температуры океана, океанической циркуляции и уровня океана
- PC: P + неорганический УЦ океана
- PCB: PC + органический УЦ океана
- PCBL: PCB + наземные экосистемы
- данные ледового бурения

Геологические источники CO_2 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

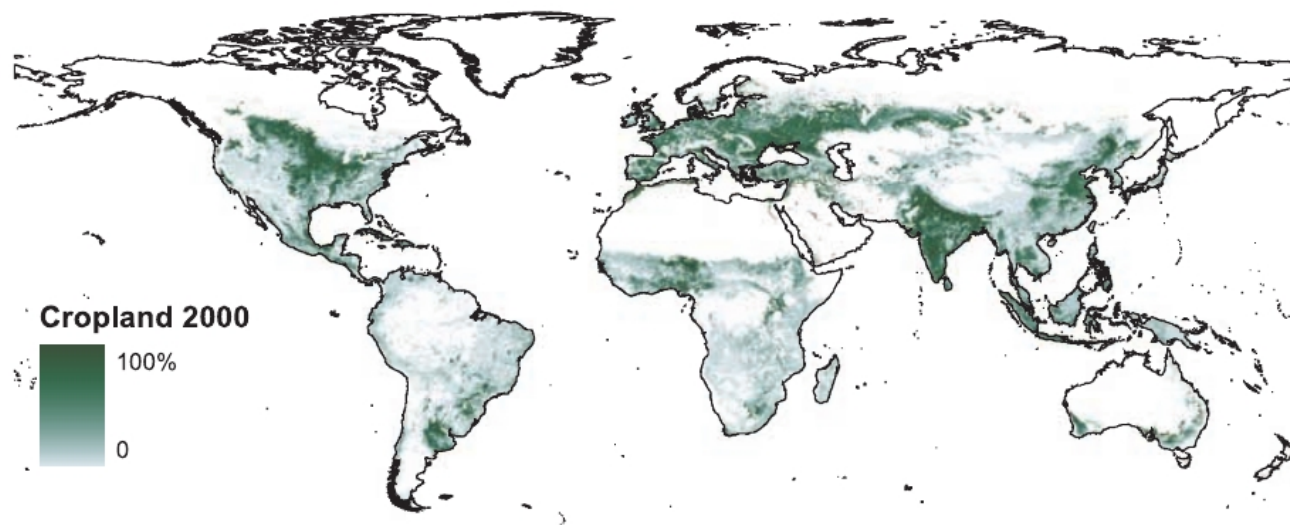
Land-use-change emissions (E_{LUC})

190 ± 65

Total emissions

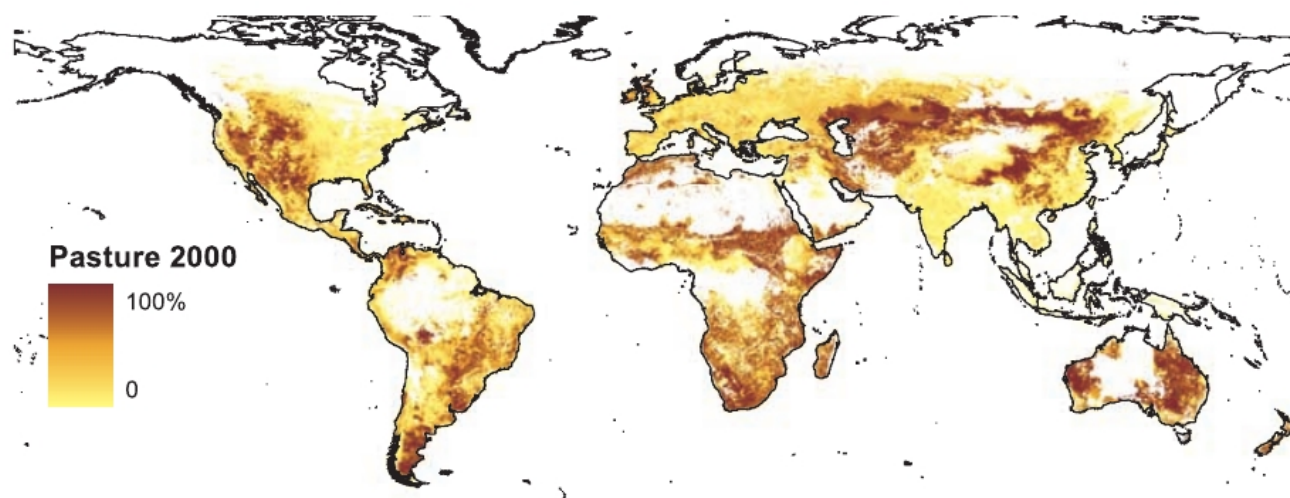
600 ± 70

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

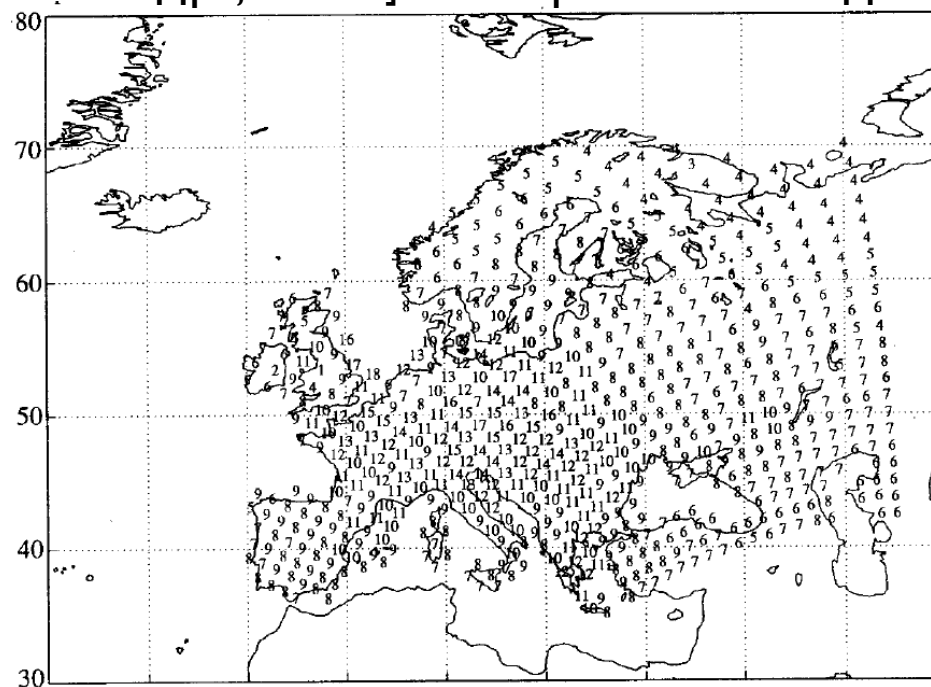


луга:

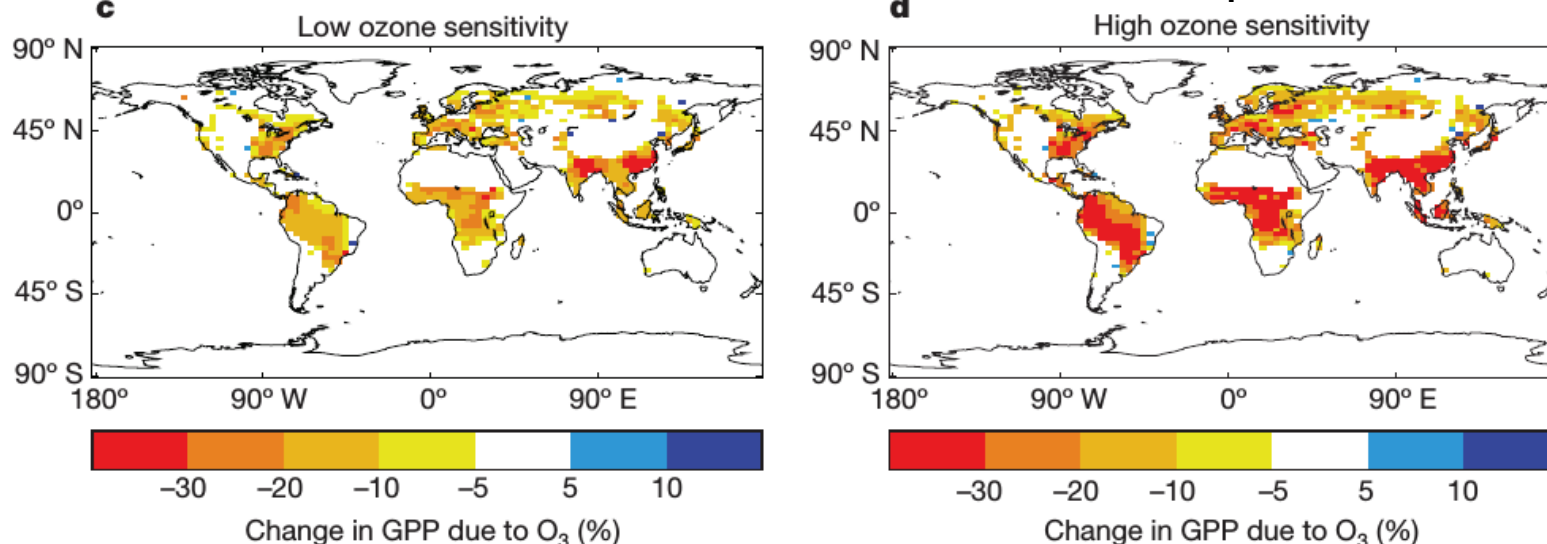
28.0 млн км²
(23.6–30.0) млн км²,
22% площади суши,
свободной ото льда

Влияние озона на интенсивность фотосинтеза

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

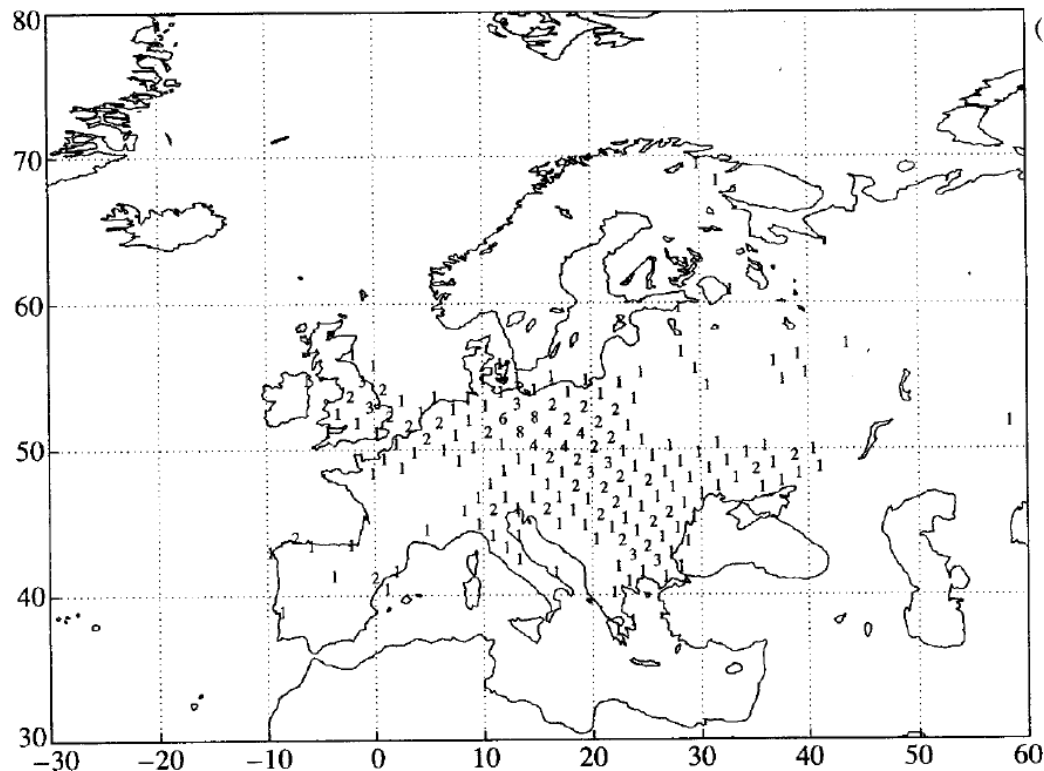


[Sitch et al., 2007]: MOSES-TRIFFID, 2100 г., сценарий SRES A2



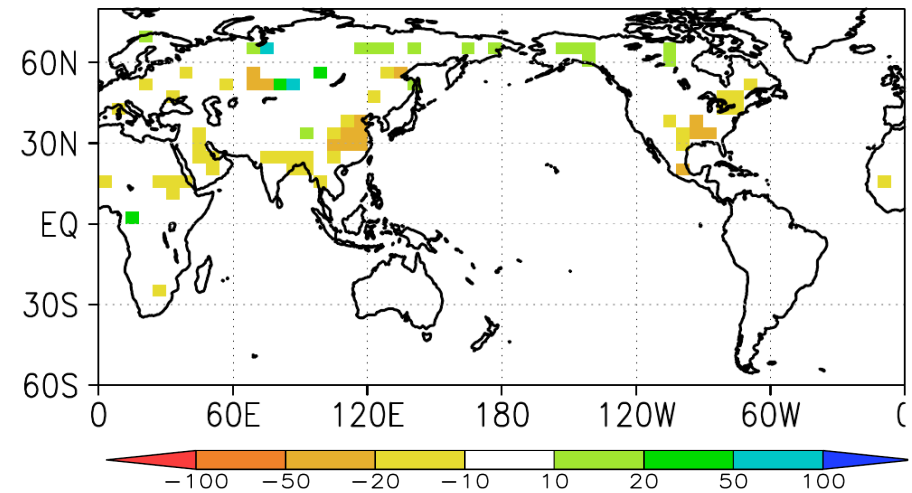
Влияние сернистого газа на интенсивность фотосинтеза

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

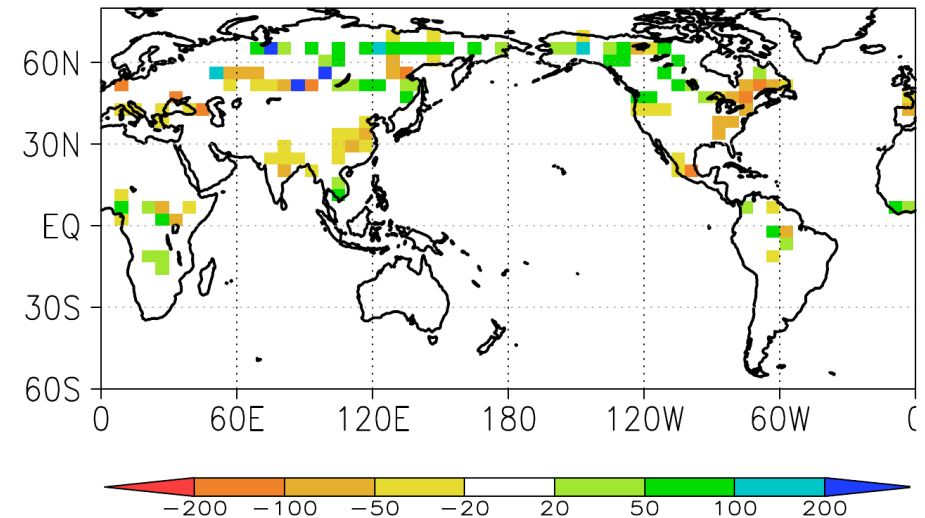


[Eliseev, 2015]: КМ ИФА РАН,
сценарий RCP 8.5

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



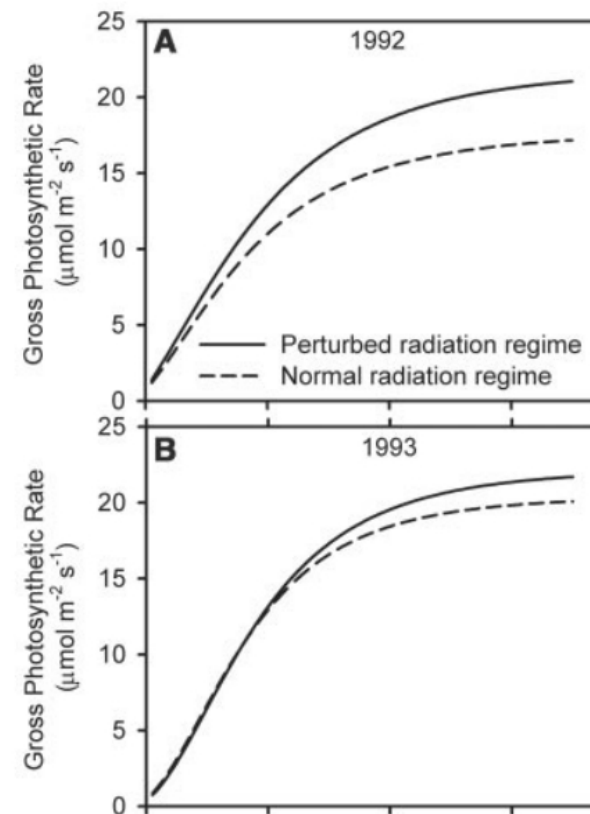
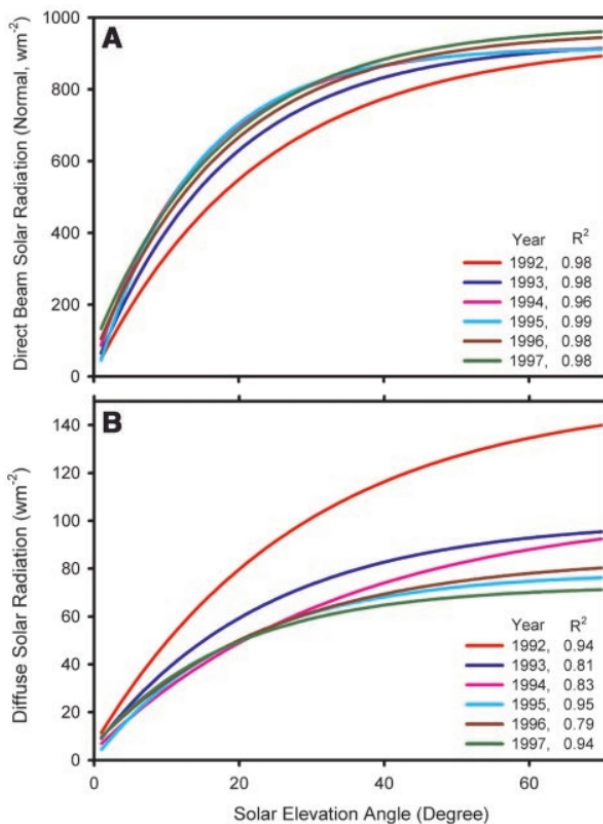
b) $\delta_{\text{eco}} c_v$ [gC m^{-2}], 2000–2010



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.

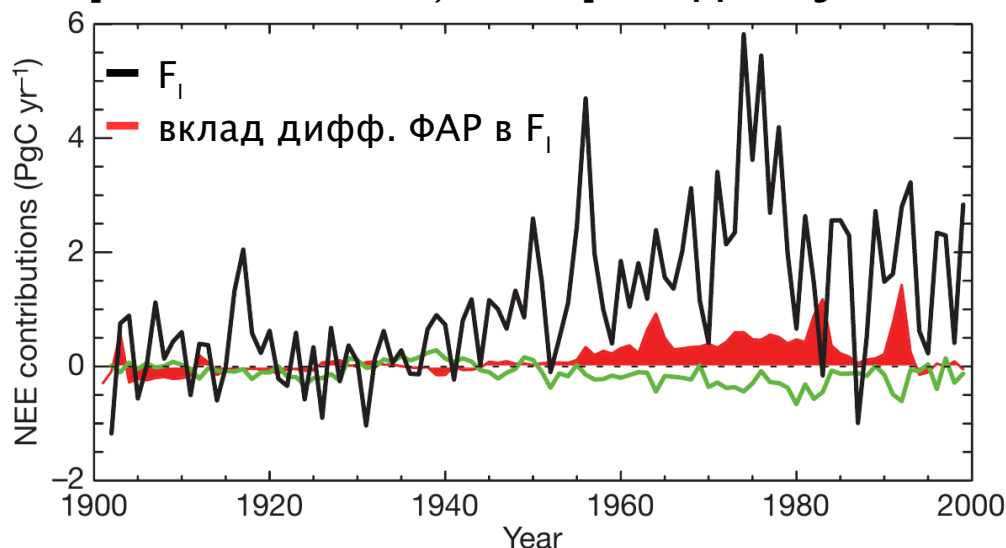


измерения проводились только в безоблачные дни \Rightarrow
эффект завышен [Angert et al., 2004: расчёты с CASA-TEM]

Влияние рассеивающих аэрозолей: расчёты с моделями

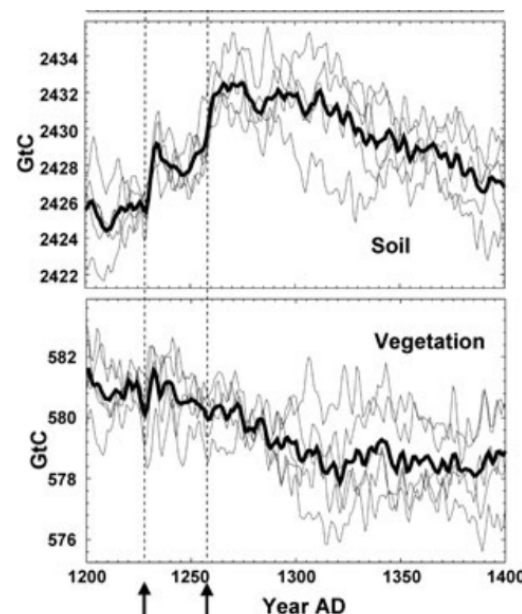
интенсификация фотосинтеза

[Mercado et al., 2009]: модель JULES



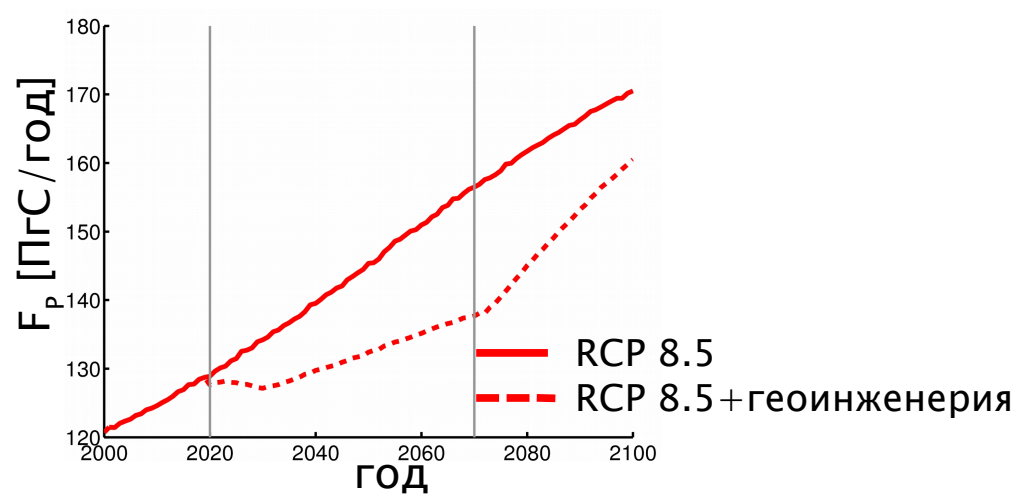
[Володин и др., 2011]: в модели ИВМ геоинженерия увеличивает NPP на 0.5 ПгС/год, несмотря на более холодный и сухой климат

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_а и гетеротрофного дыхания_н 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).

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_l 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**

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

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

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

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



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

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

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



Косвенные (климатические) эффекты уменьшают сток CO_2 из атмосферы

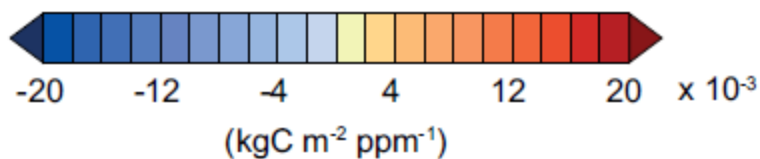
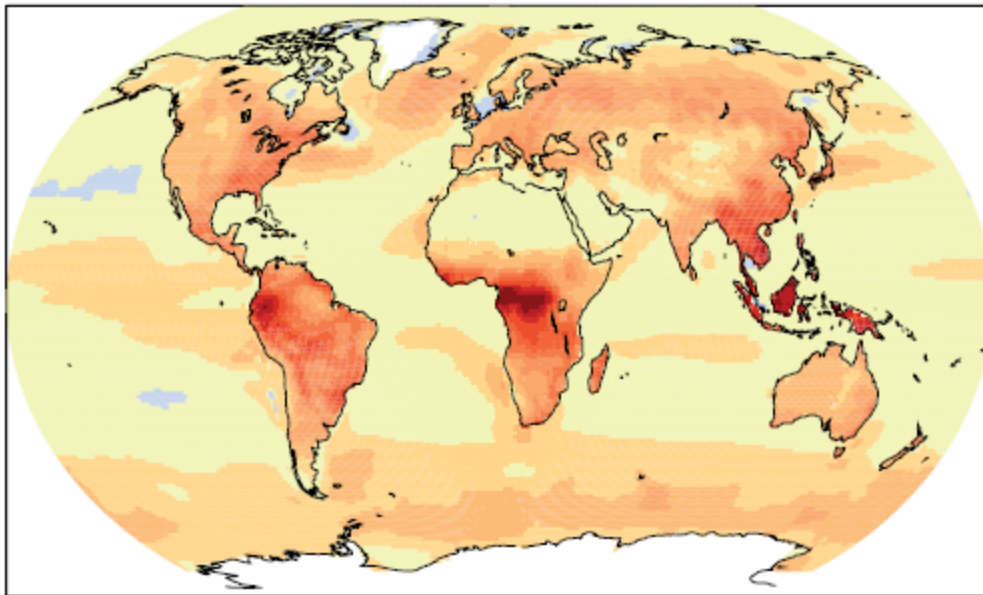
Оценка прямого и косвенного эффектов в наземном с углеродном цикле [IPCC, 2013]

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

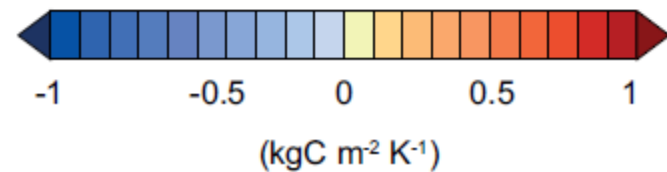
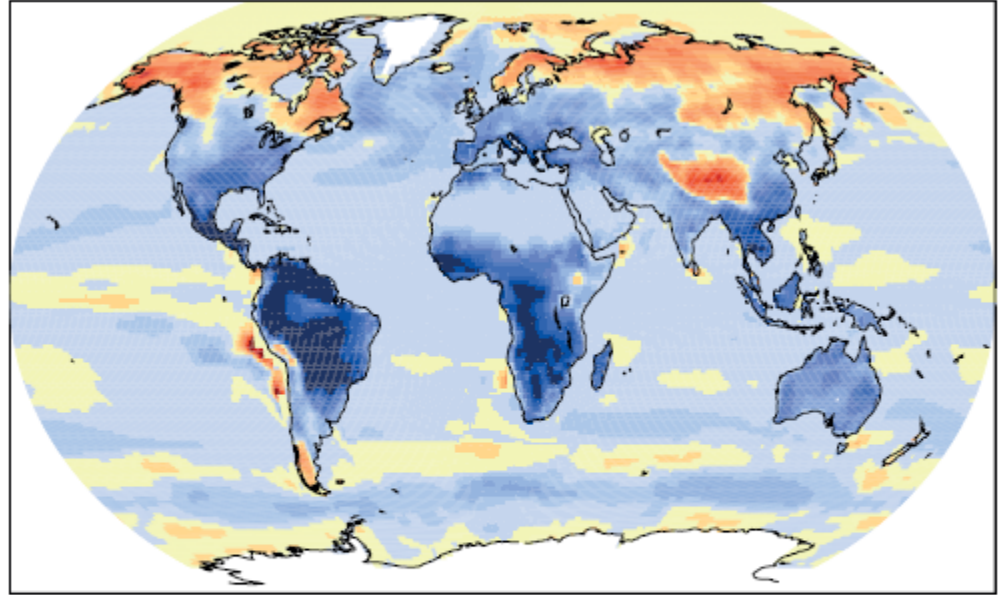
F – поток CO_2 из атмосферы в океан и наземные экосистемы на единицу площади

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

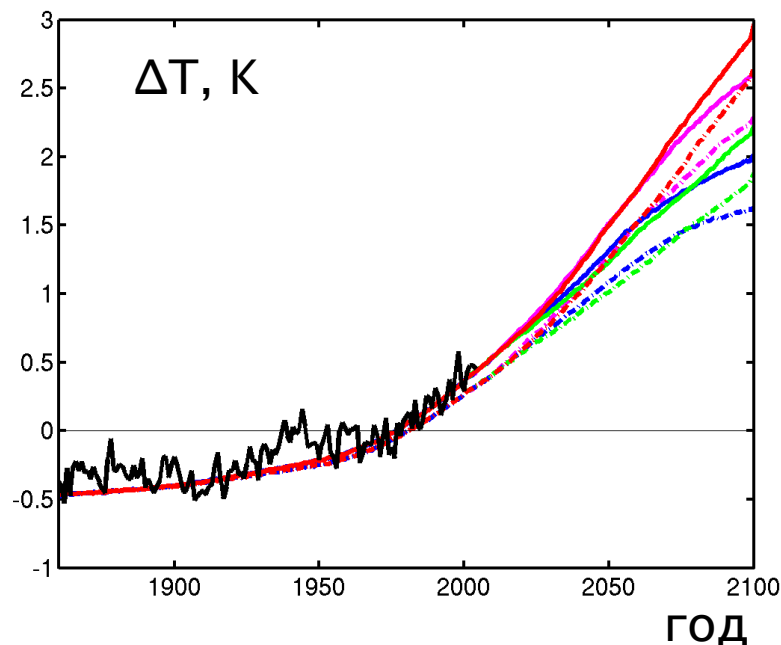
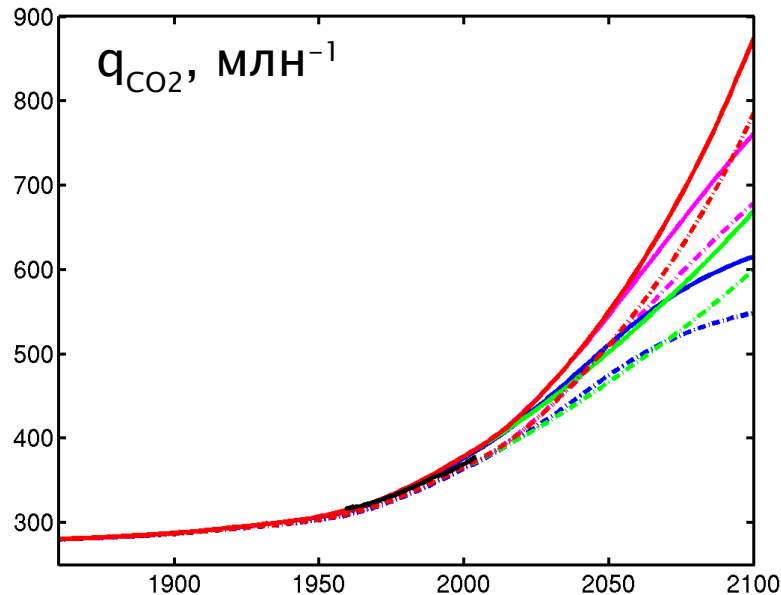
а) прямой эффект $\partial U / \partial q_{\text{CO}_2}$



б) 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)
 $\Delta T(2100 \text{ г.}) = 3.38 \text{ K}$ (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)

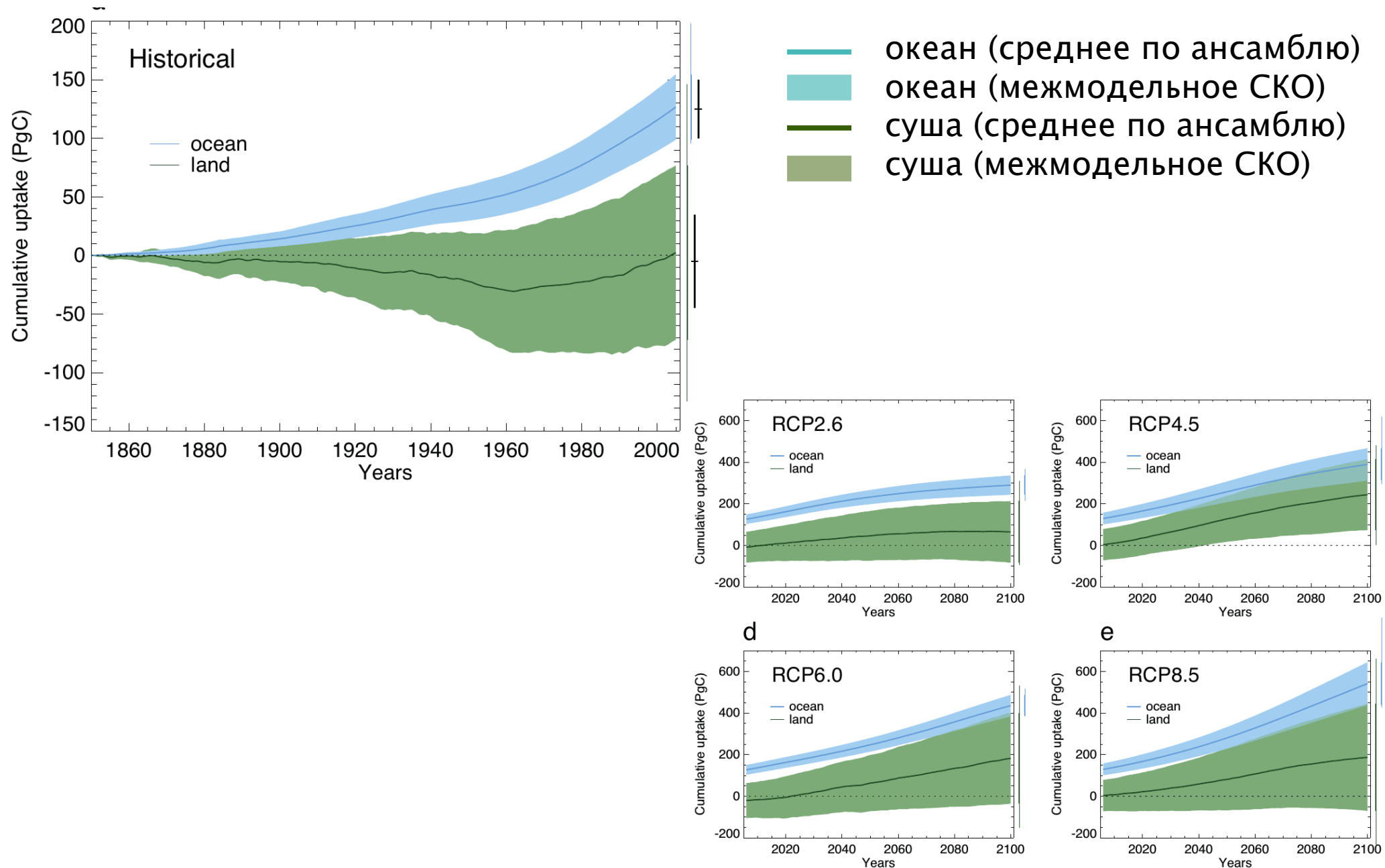
SRES B2
 $q_{CO_2}(2100 \text{ г.}) = 669 \text{ млн}^{-1}$ (69 млн⁻¹)
 $\Delta T(2100 \text{ г.}) = 2.65 \text{ K}$ (0.34 K)

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)



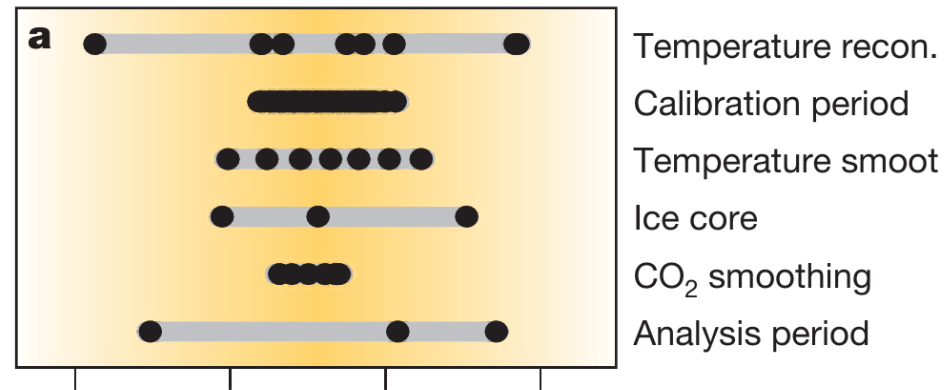
Взаимодействие климата и углеродного цикла увеличивает отклик на ~1/10

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

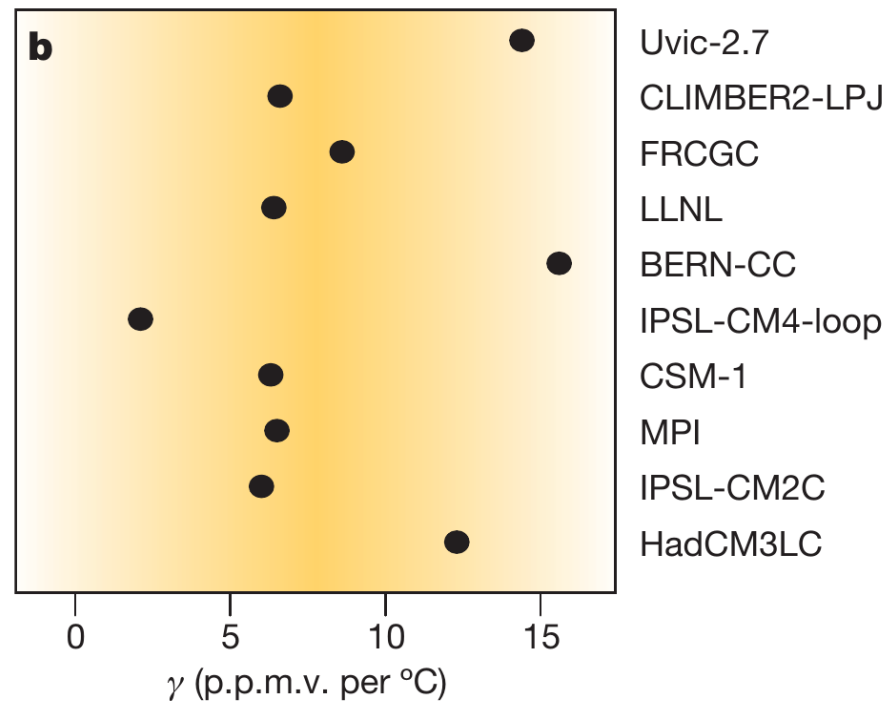


Эмпирические оценки коэффициента ОС между климатом и углеродным циклом [Frank et al., 2010]

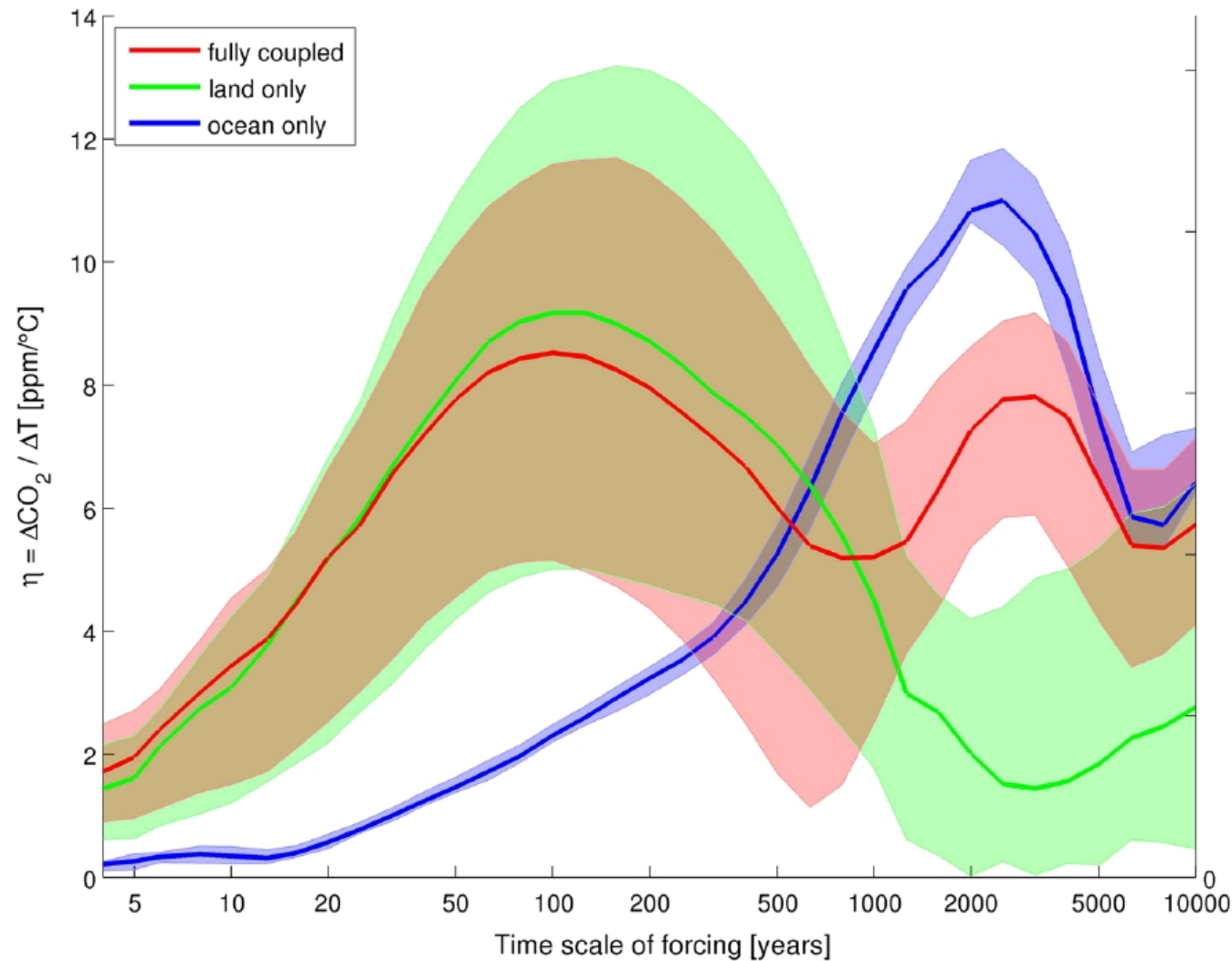
реконструкции
для последнего
тысячелетия



модели земной
системы

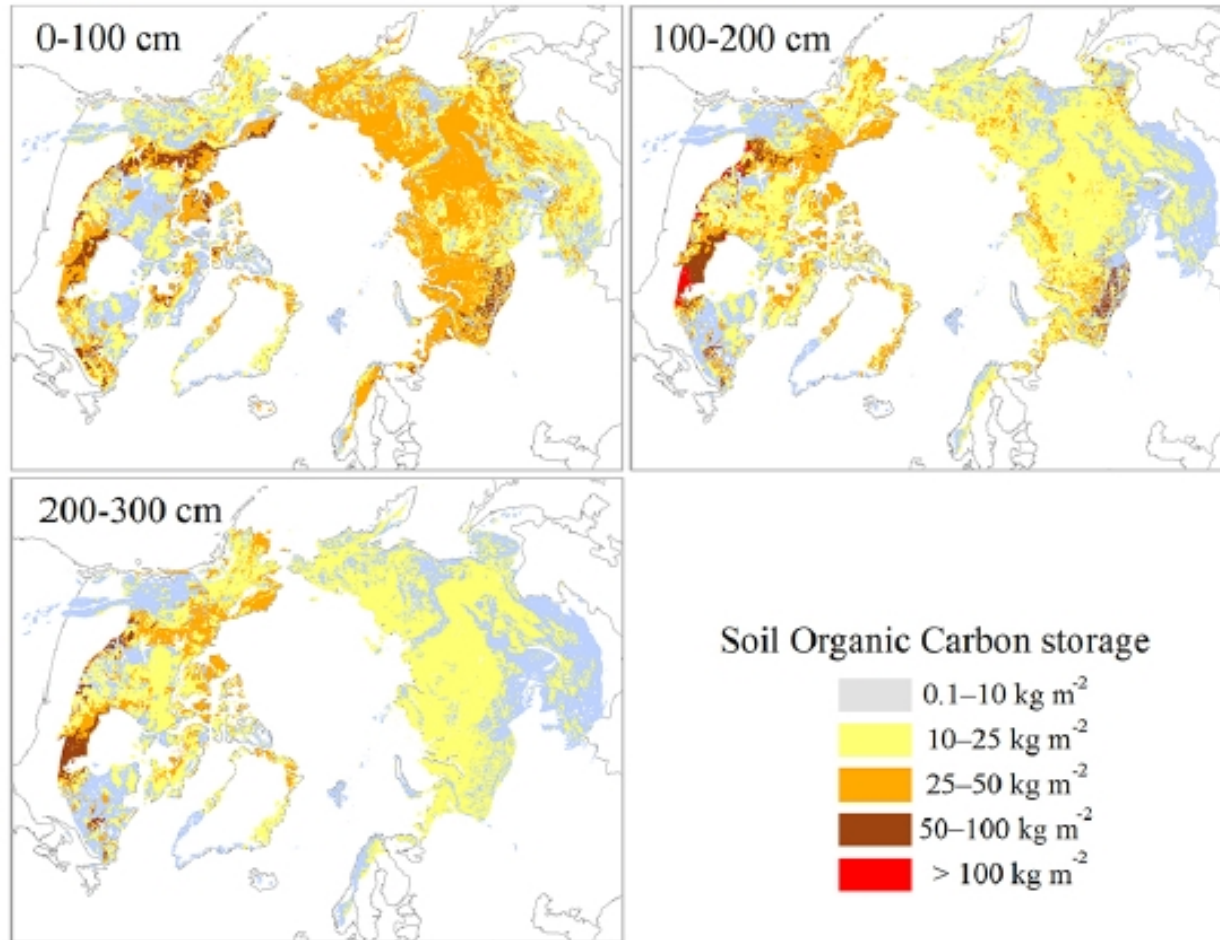


Зависимость коэффициента ОС между климатом и углеродным циклом от временного масштаба: модель Climber-2 [Willeit et al., 2014]



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

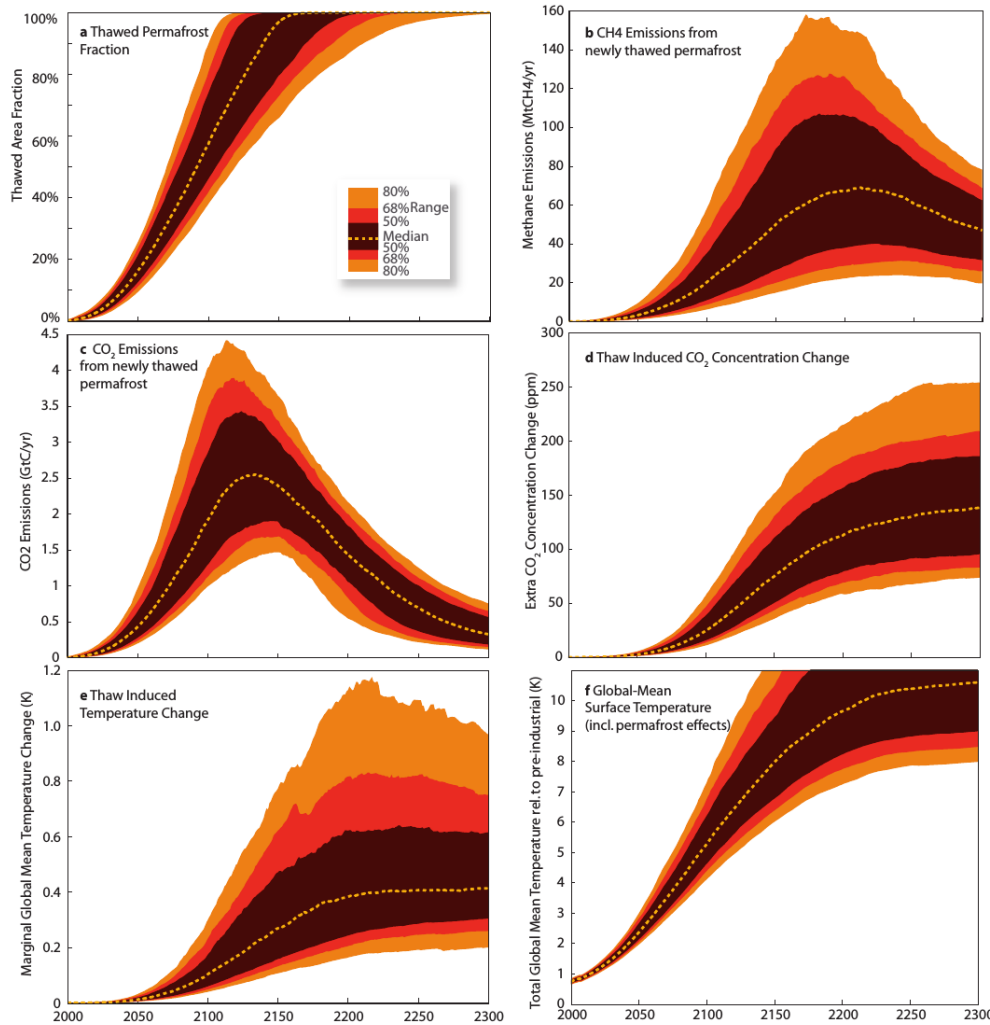
всего: 1400–1850 ПгС

всего: 1672 ПгС

глобально: 2344 ПгС [Jobbágy and Jackson, 2000]

Выделение углерода из почвы при таянии вечной мерзлоты

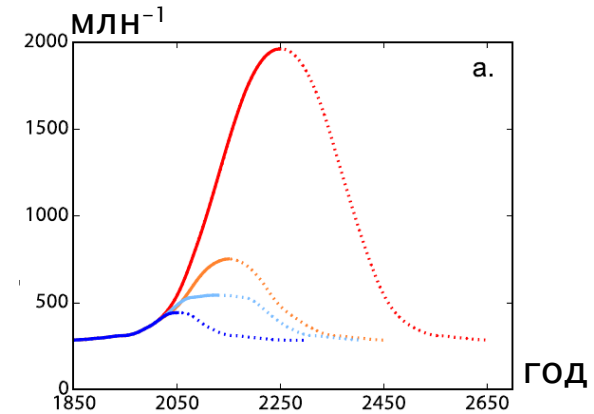
[Schneider von Deimling et al., 2012]
MAGICC6, RCP 8.5



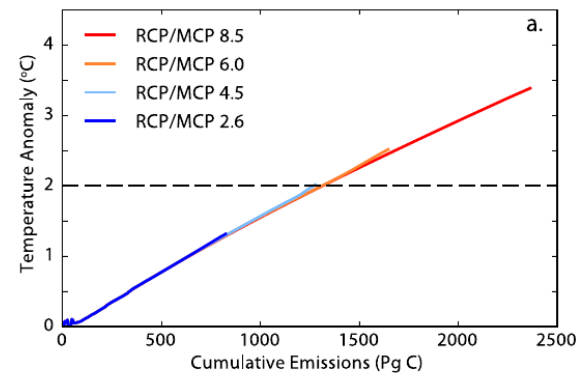
↓
слабая ОС

[MacDougall et al., 2015], UVic EMIC

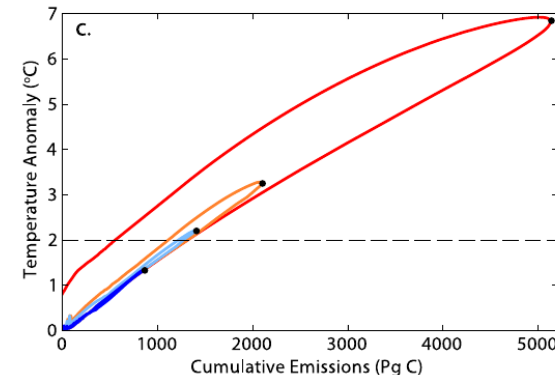
внешние
воздействия ⇒
(на примере
 q_{CO_2})



результаты



↖ версия без эмиссий
CO₂ и CH₄ при
деградации вечной
мерзлоты

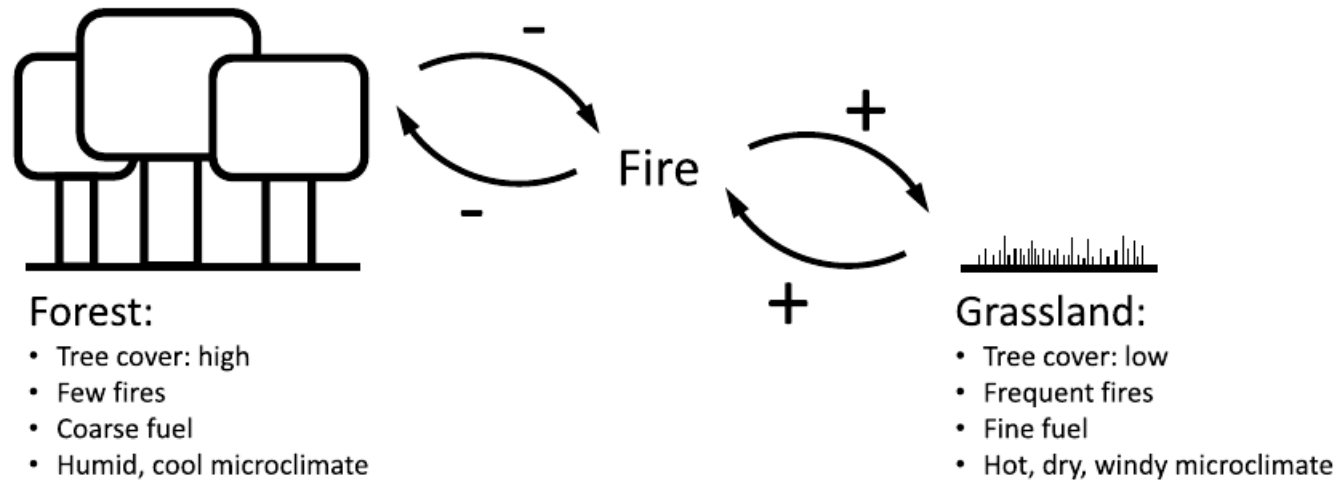


⇐ полная модель

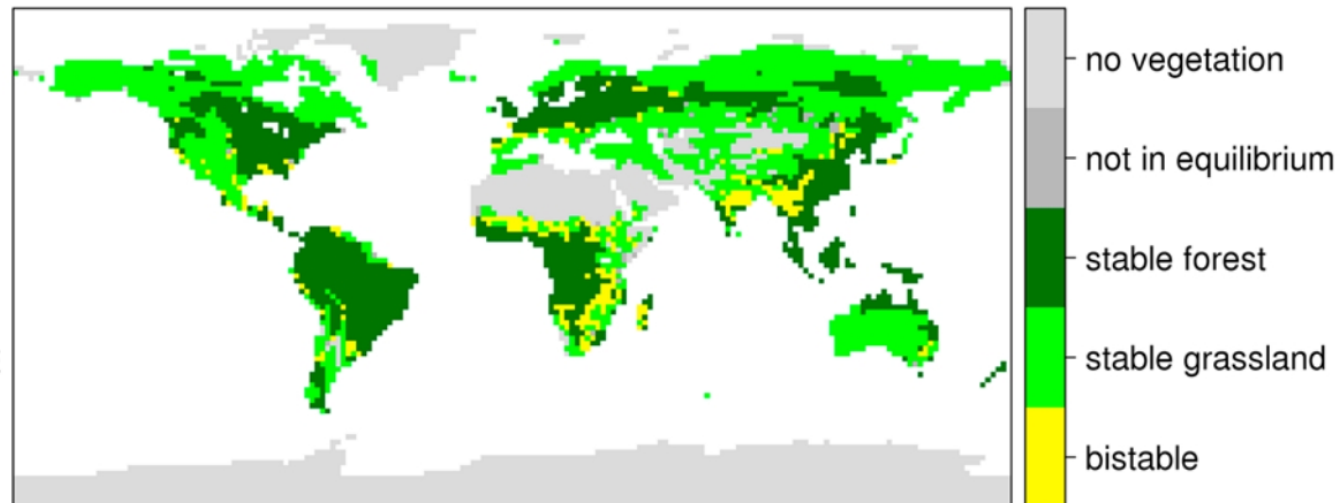
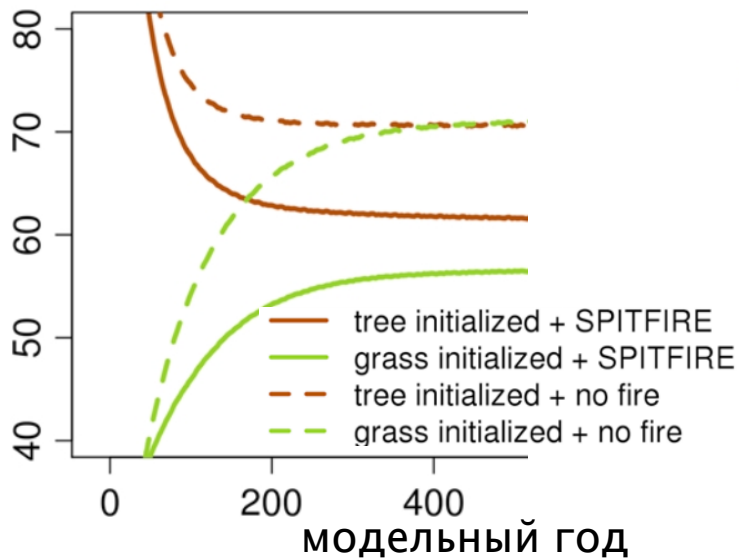
⇓
сильная ОС

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

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

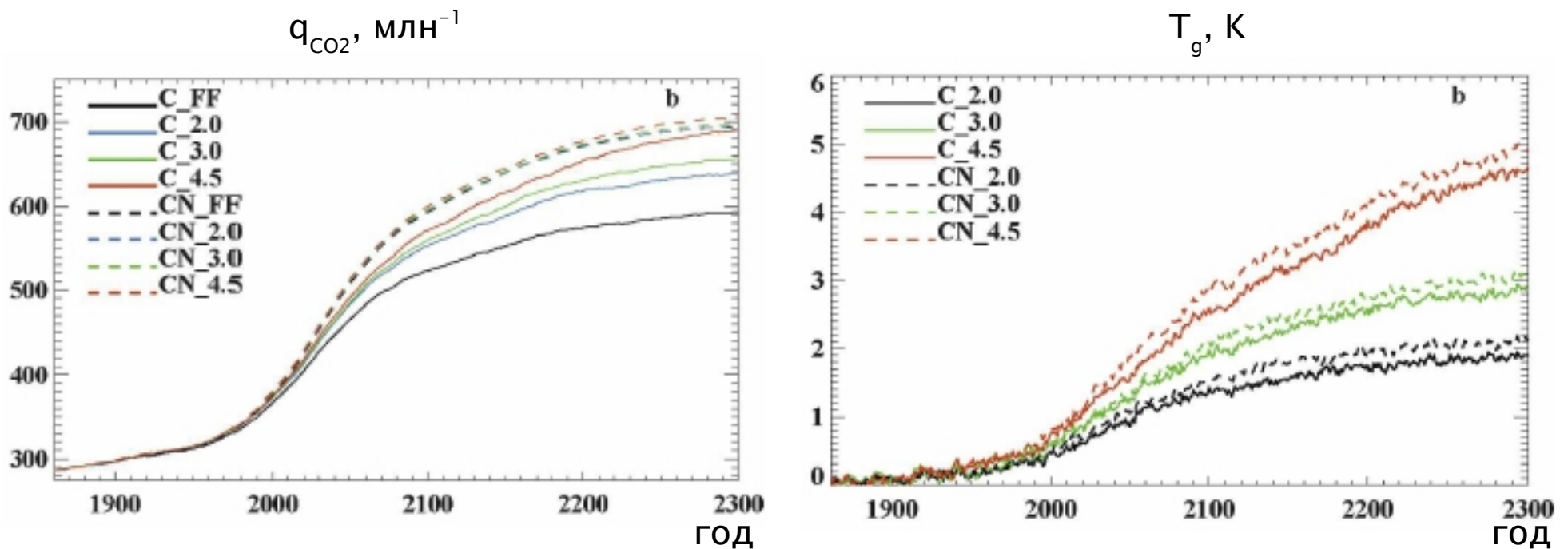


площадь лесов [млн км²]



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)

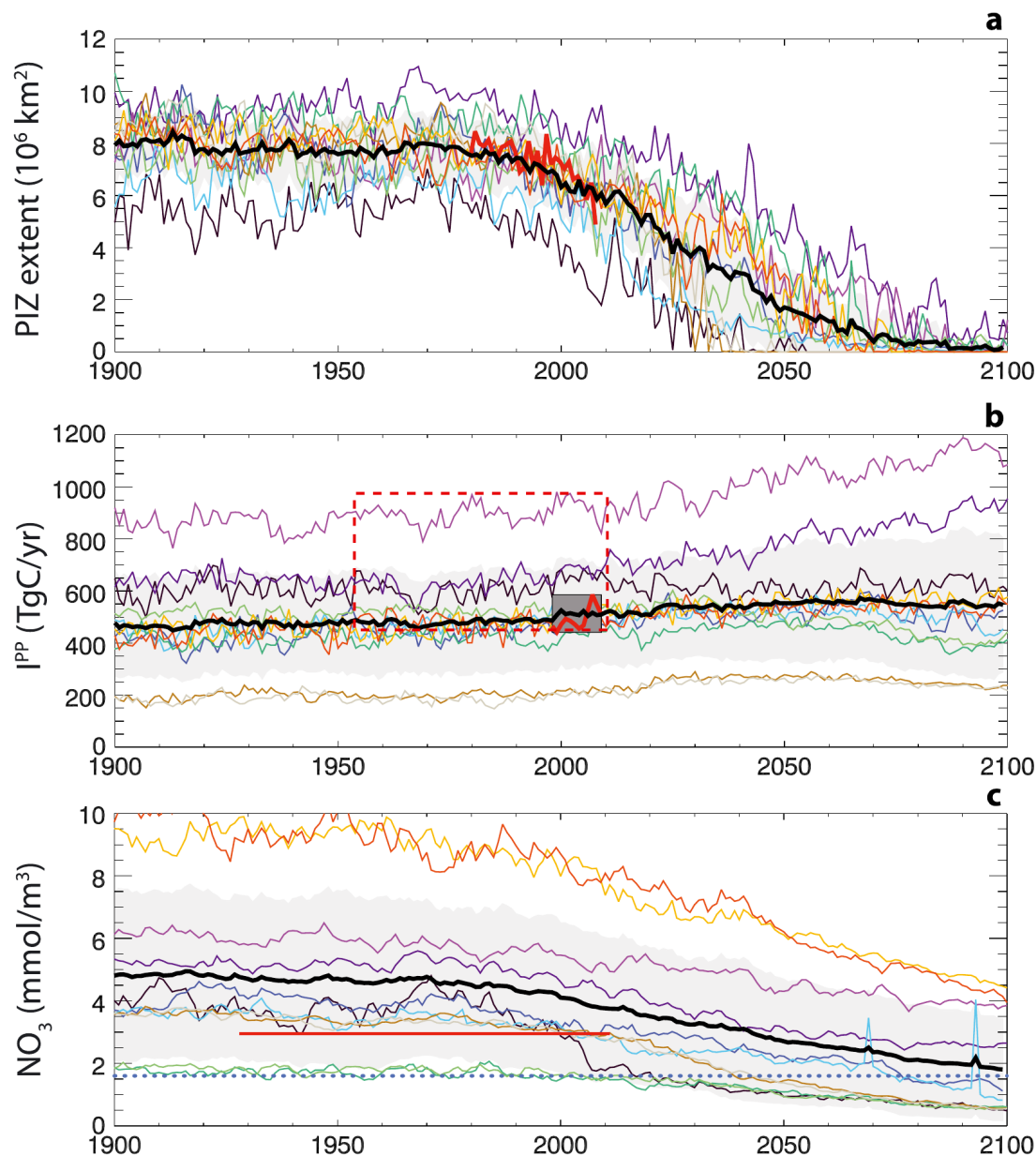


C — только углеродный цикл

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]



Legend for the models shown in the plots:

- CanESM2
- GFDL-ESM2G
- GFDL-ESM2M
- HadGEM2-CC
- HadGEM2-ES
- IPSL-CM5a-LR
- IPSL-CM5a-MR
- MIROC-ESM
- MIROC-ESM-CHEM
- MPI-ESM-LR
- MPI-ESM-MR
- MEAN MODEL
- OBS
- N-Half Saturation

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 эмиссии CO_2 в XXI веке.**
- Количественные различия модельных оценок могут быть связаны с недостаточным учётом взаимодействия углеродного цикла с другими биогеохимическими циклами.