



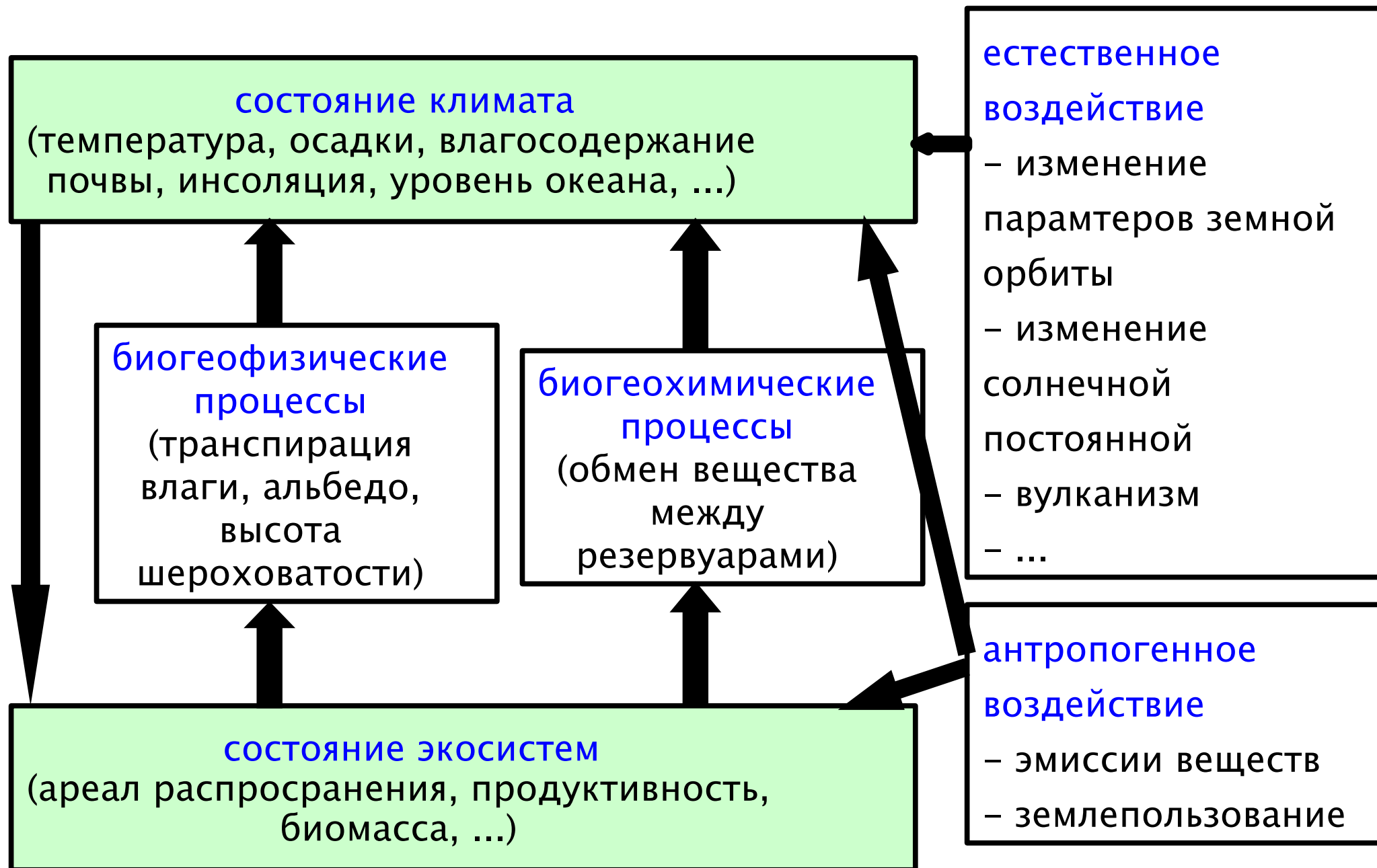
Глобальное моделирование взаимодействия климата и наземных экосистем

А.В. Елисеев

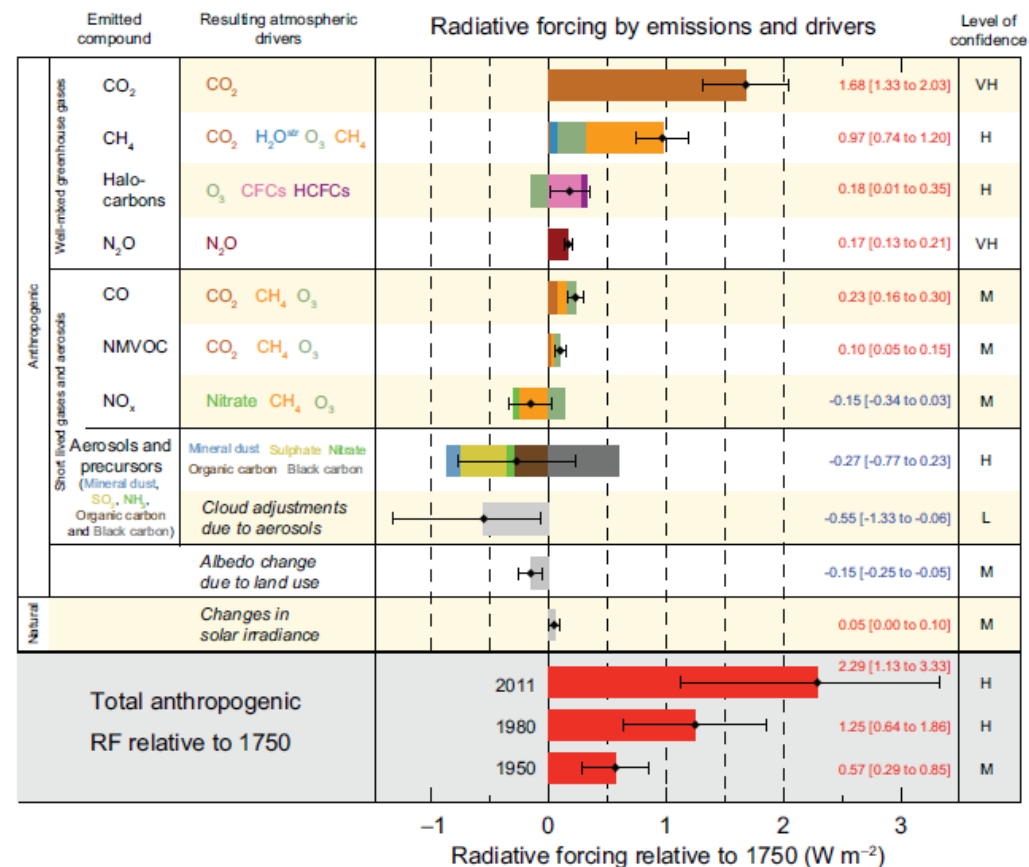
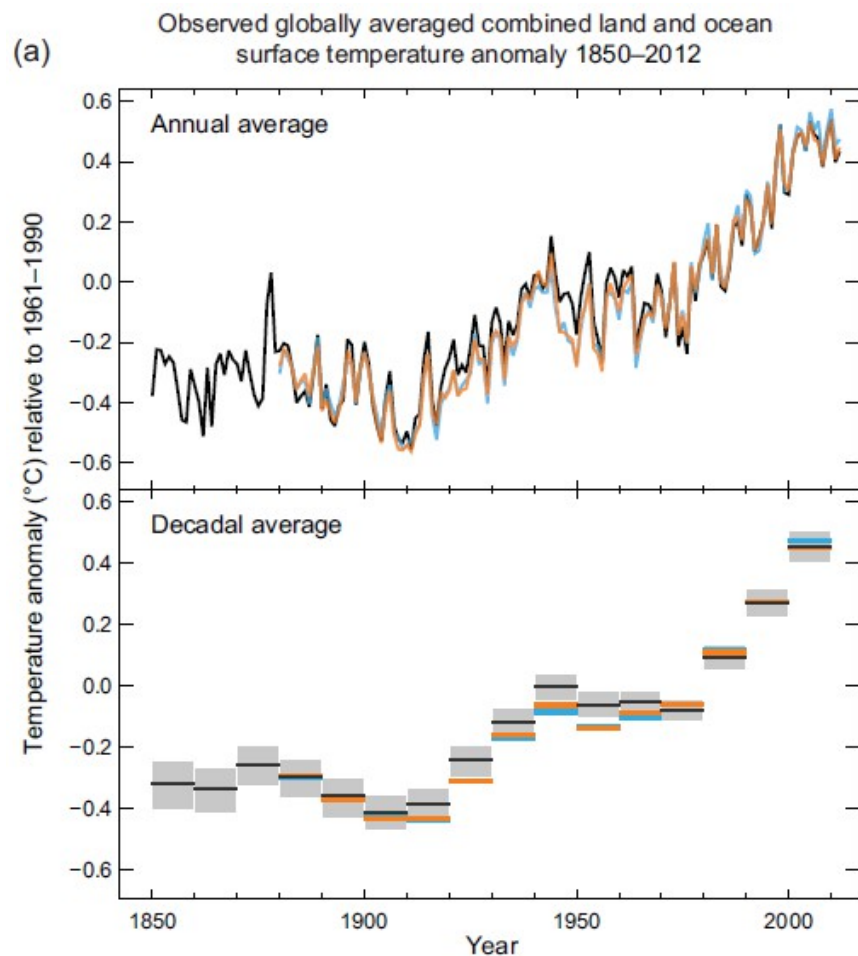
ИФА им. А.М. Обухова РАН

**школа–конференция молодых ученых "Изменения климата и
окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация",
Кисловодск, 15–21 сентября 2014 г.**

Взаимодействие климата и экосистем



Изменения климата в индустриальный период [IPCC, 2013]



Изменения климата способны модифицировать характеристики и биогеофизических, и биогеохимических процессов

Влияние растительности на гидрологический цикл

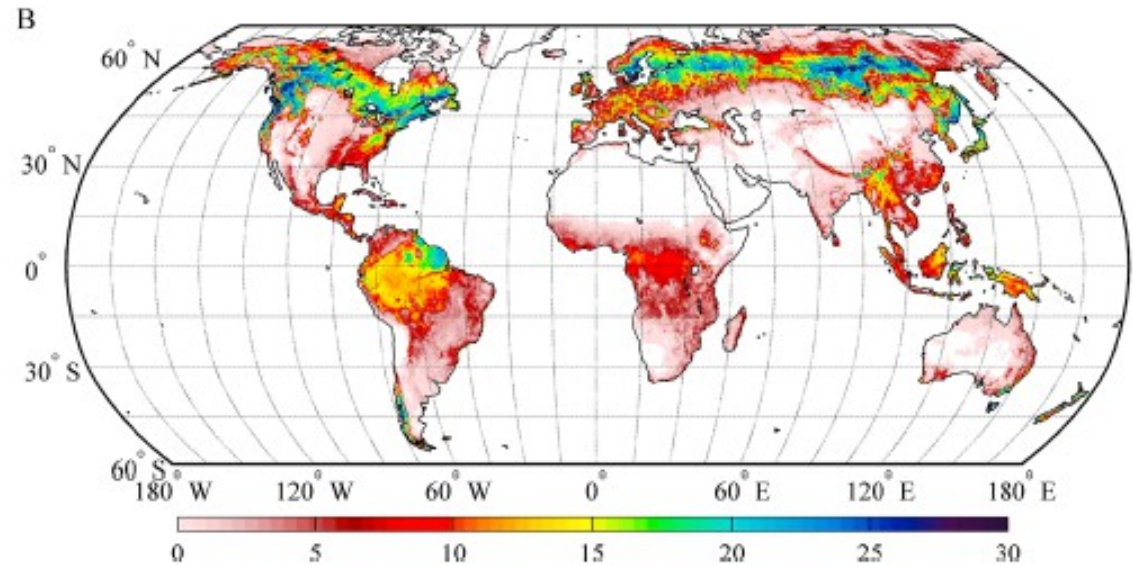
– перехват влаги растительностью

доля осадков [%],
перехватываемых
растительностью
(объединение прямых
измерений и спутниковых
данных MODIS) [Miralles et al.,
2010]

по всей суше:

7 % [Miralles et al., 2010]

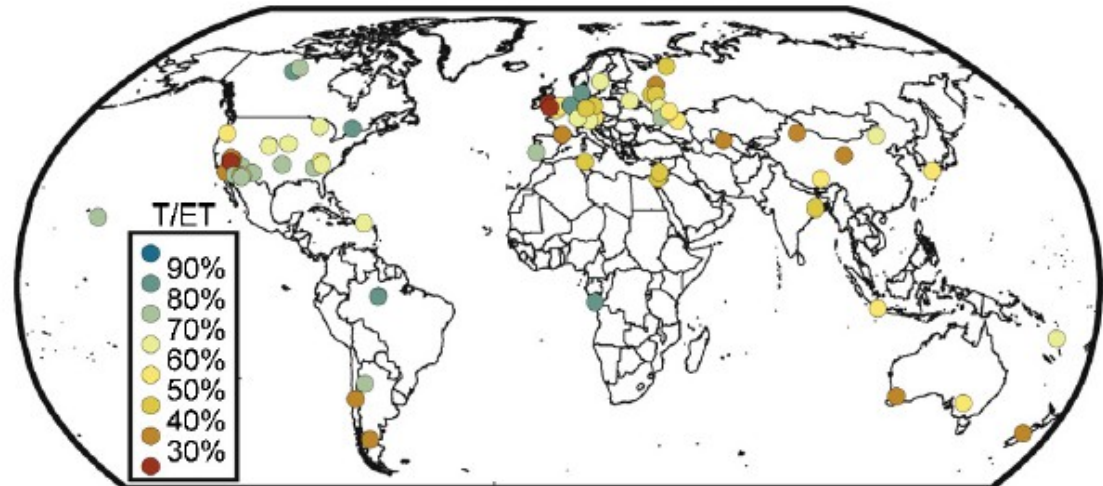
18% [Wang et al., 2007]



– транспирация влаги

доля транспирации [%] в полной
эвапотранспирации (прямые
измерения) [Schlesinger and
Jasechko, 2014]

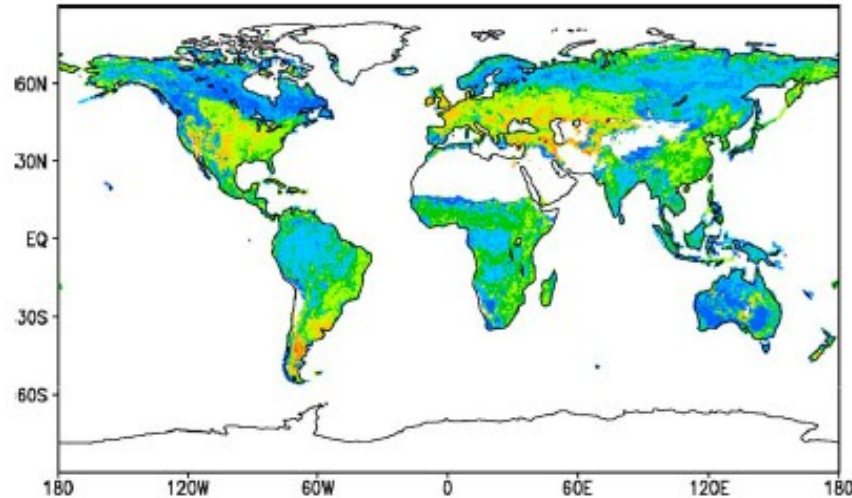
по всей суше: 61 ± 15 %



Влияние растительности на альbedo поверхности

– Зависимость альbedo поверхности от типа экосистем

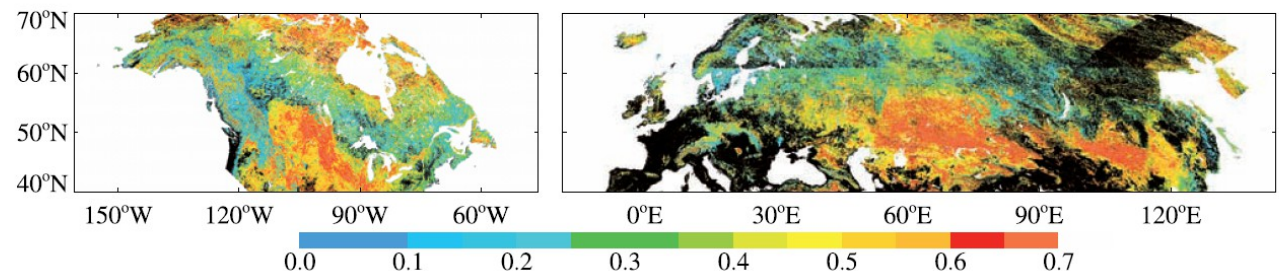
альbedo растительности по
спутниковым данным MODIS
[Rechid et al., 2009]



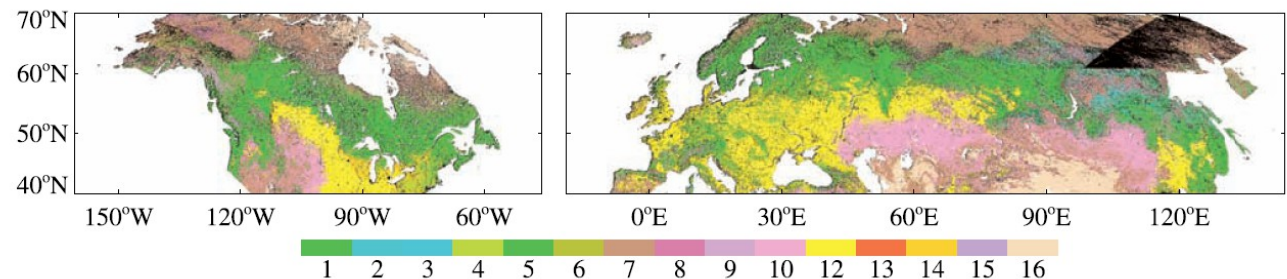
– "Маскировка" снега древесной растительностью

Результаты измерений MODIS над заснеженной поверхностью [Jin et al., 2002]

альbedo

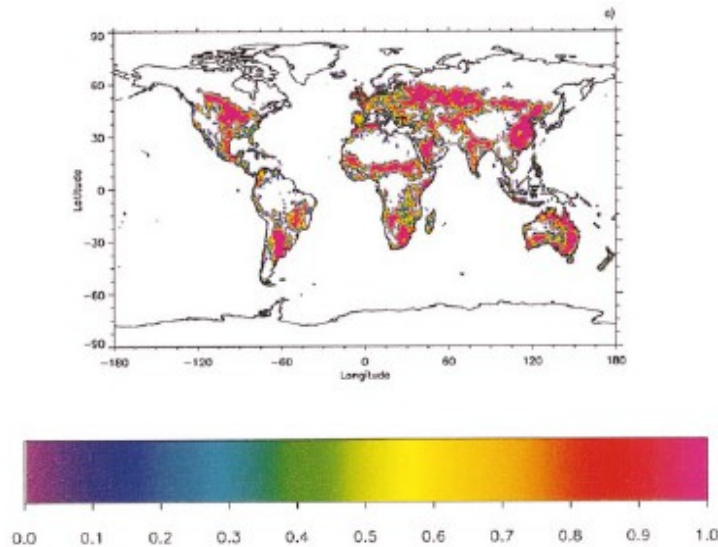


типы экосистем
(1–6 – леса)

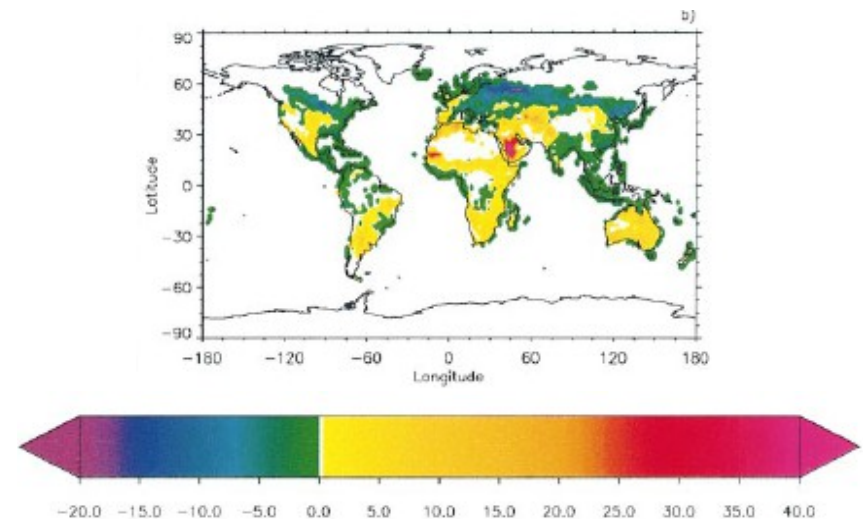


Изменение экосистем за счет землепользования [Myhre and Myhre, 2008]

доля сельскохозяйственных угодий



радиационный форсинг [Вт/м²]

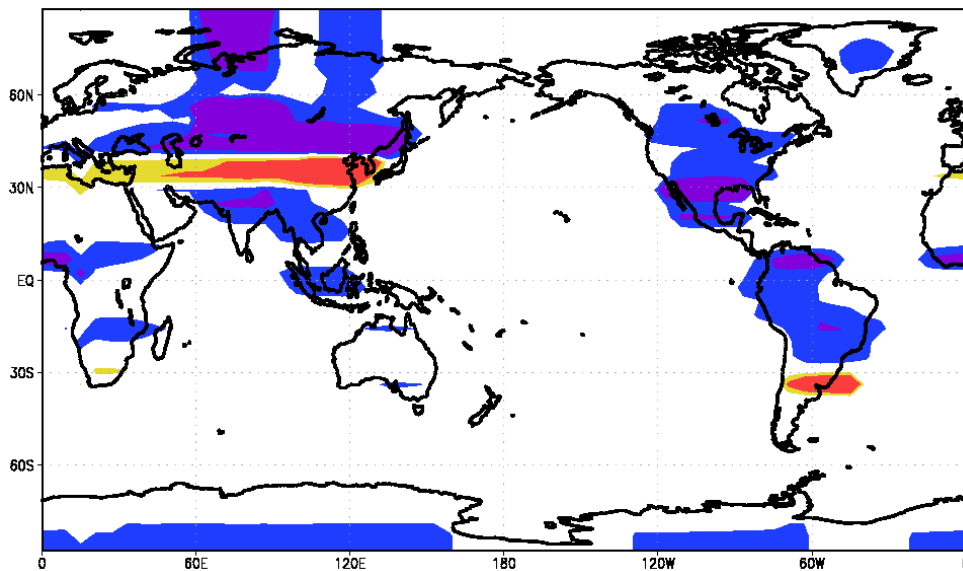


Согласно [IPCC, 2013] полный радиационный форсинг за счет изменения альбедо за период 1750–2011 гг. равен 0.15 ± 0.1 Вт/м² (из 1.1–3.3 Вт/м² полного антропогенного радиационного форсинга на земную климатическую систему)

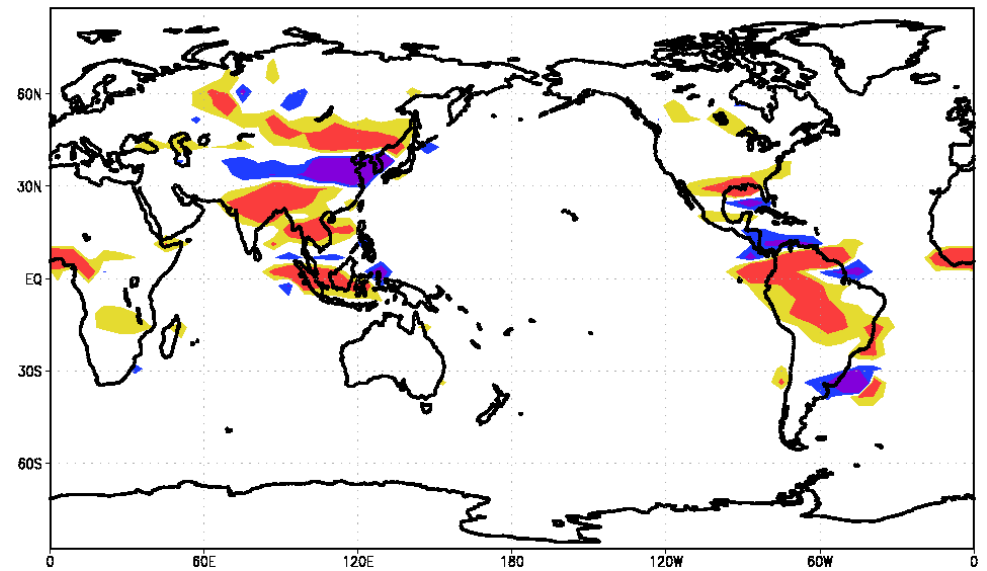
Влияние землепользования в XX веке в расчётах с КМ ИФА РАН

[Елисеев, Мохов, 2011]

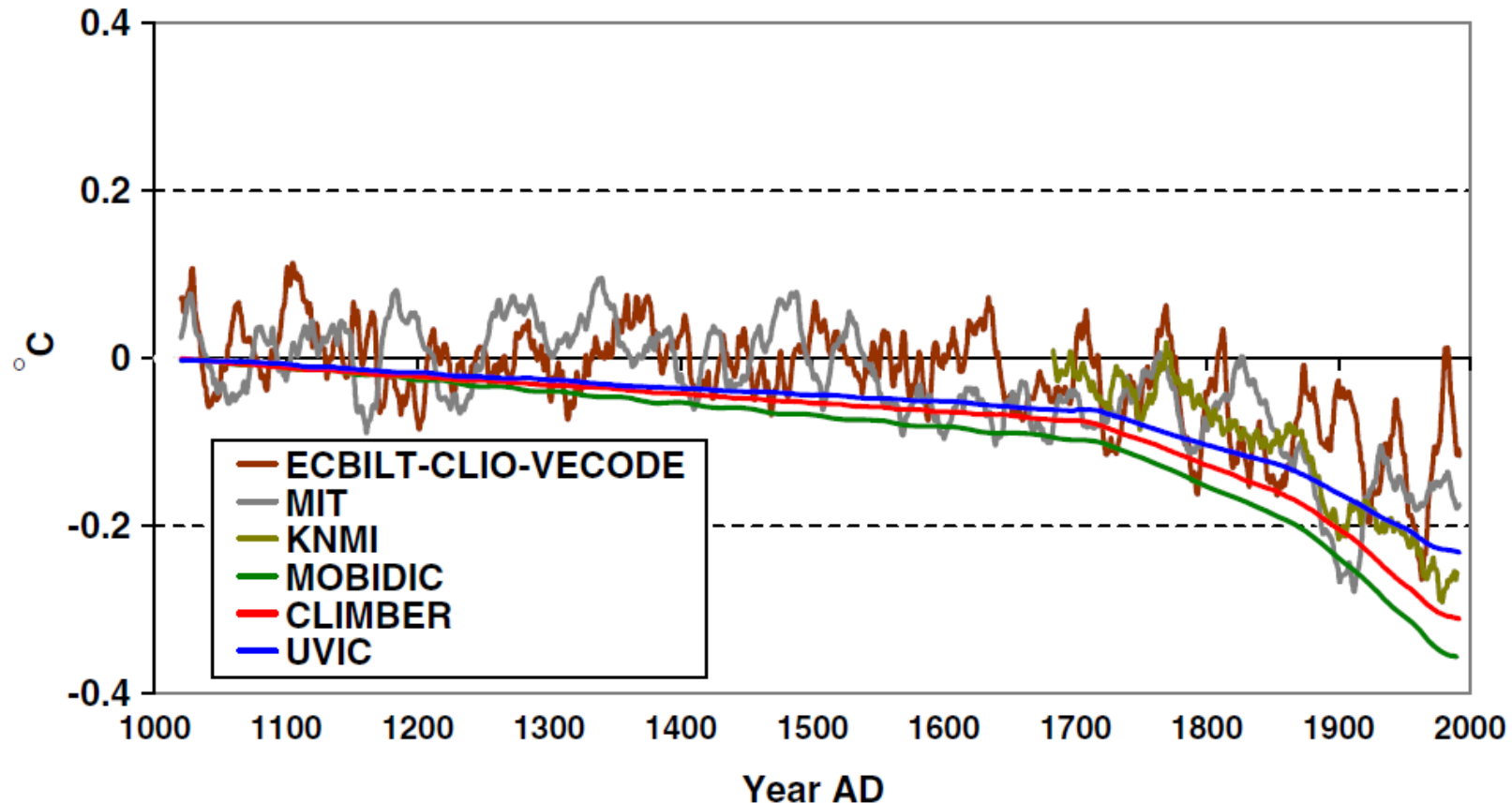
изменение среднегодовой
температуры [K]



изменение годовых сумм осадков
[см/год]

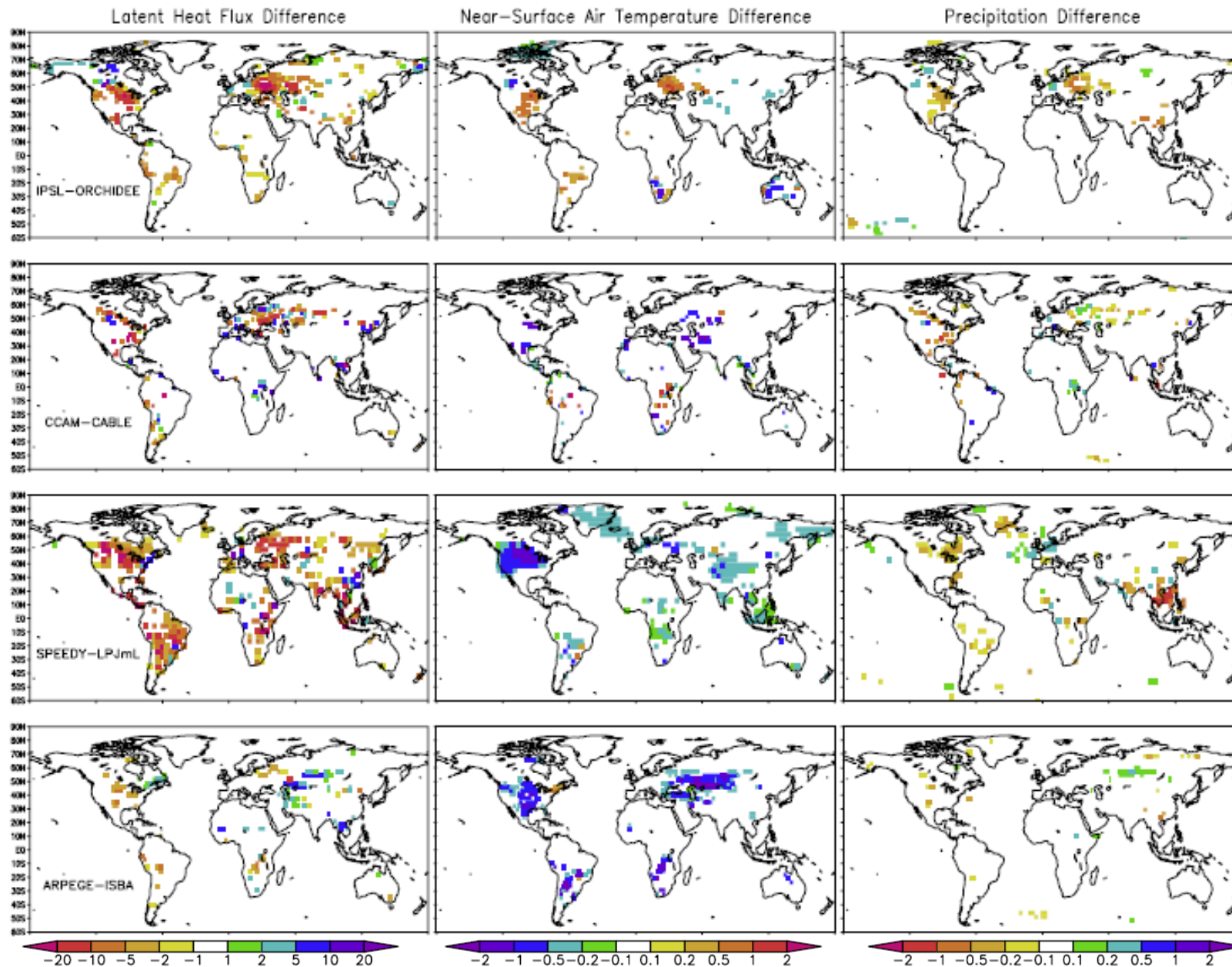


Сравнение отклика моделей на изменение
землепользования [Brovkin et al., 2006].
Глобальный отклик



2000 г.: – (0.14 – 0.25) К

Проект сравнения атмосферных моделей на изменение землепользования LUCID [Pitman et al., 2009]



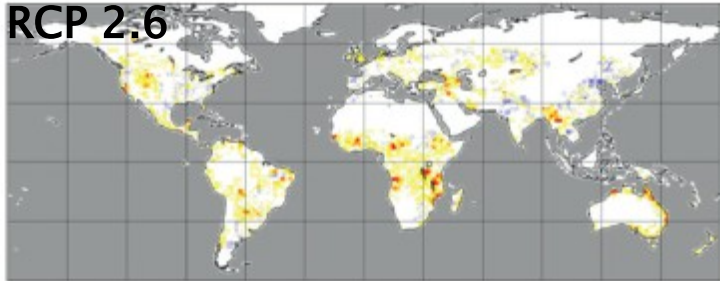
модели с
учётом
откликом
эвапо-
транспи-
рации

модели
без учёта
отклика
эвапо-
транспи-
рации

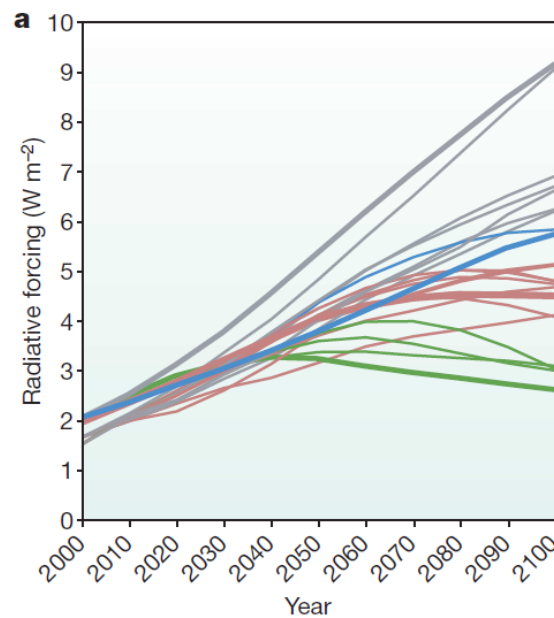
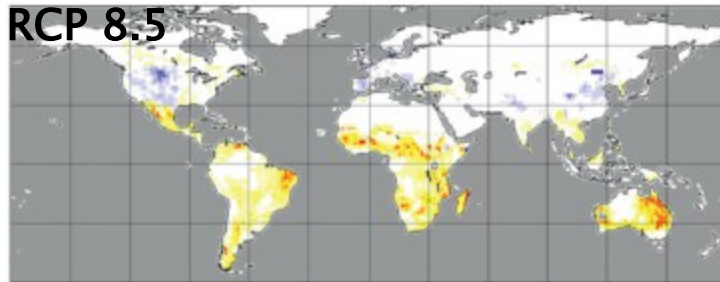
Влияние землепользования в XXI веке (CMIP5) [Brovkin et al., 2013]

внешние воздействия

RCP 2.6



RCP 8.5



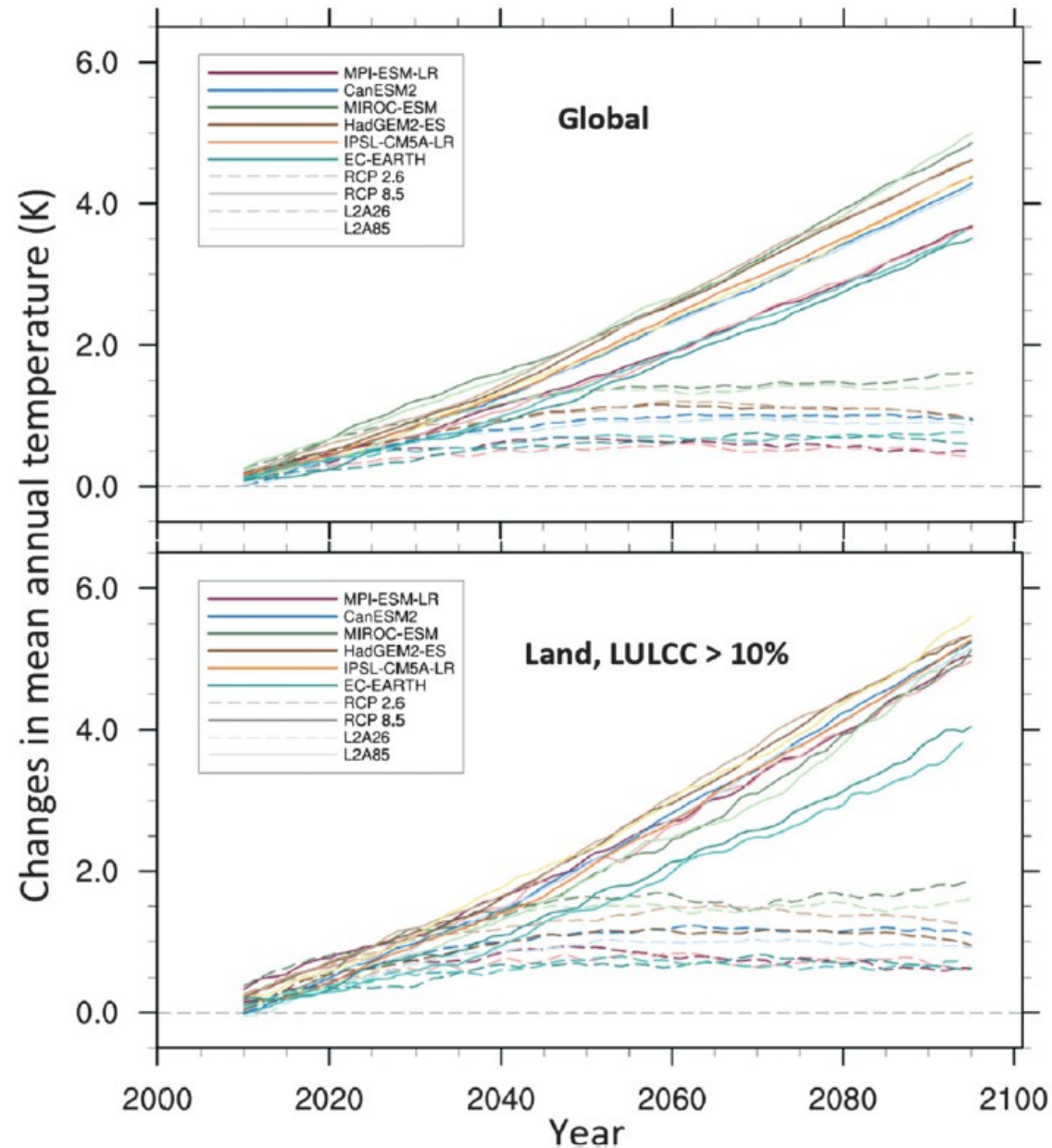
RCP 8.5

RCP 8.5

RCP 8.5

RCP 8.5

ОТКЛИК

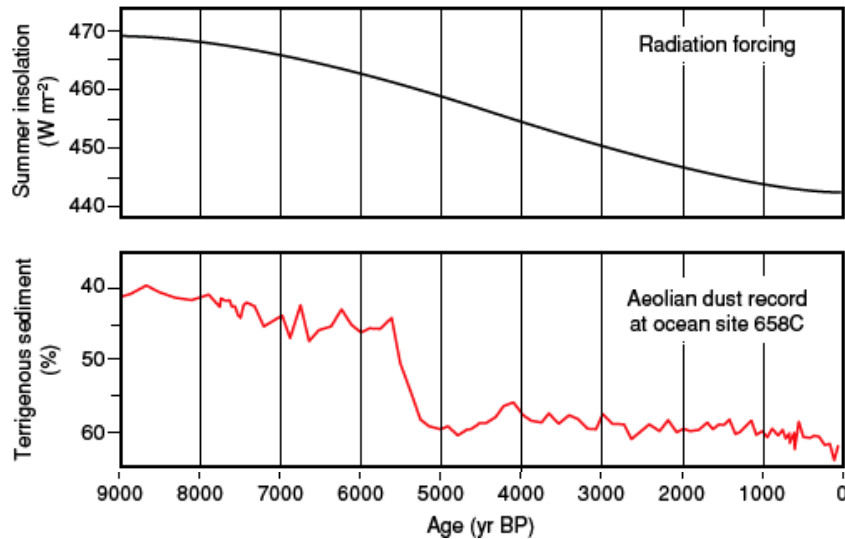


Global

Land, LULCC > 10%

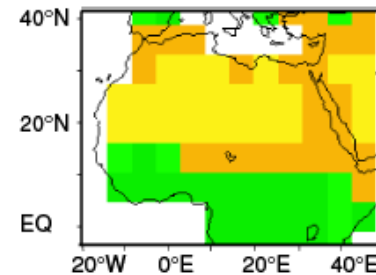
Мультистабильность системы "климат–растительность" (на примере "зелёной Сахары") [Claussen, 2008]

данные наблюдений

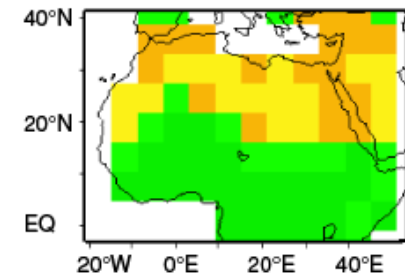


расчёты с моделью ECHAM3-BIOME1

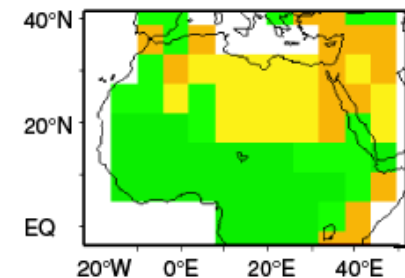
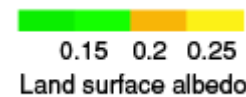
"пустыня"



"зелёная Сахара"



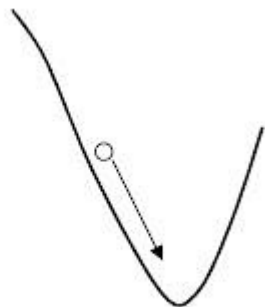
совре-
менный
климат



средний
голоцен
(6 тыс.
л.н.)

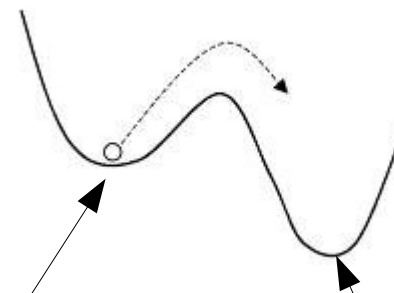
интерпретация

6 тыс. л.н.



растительность

современный климат



растительность

пустыня

Основные биогеохимические циклы

- углеродный:

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

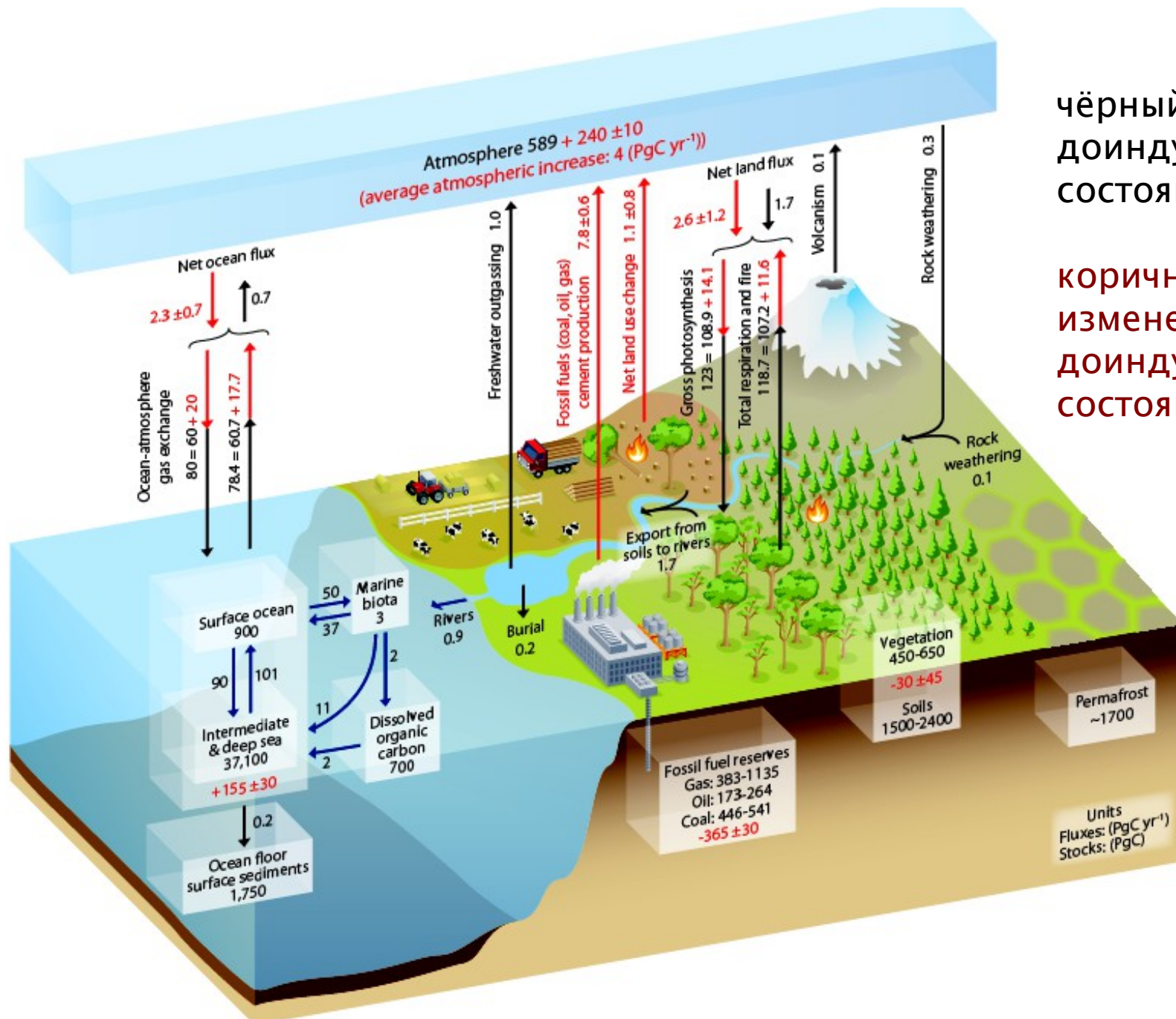
- азотный:

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

- фосфорный

- ...

Глобальный углеродный цикл [IPCC, 2013]

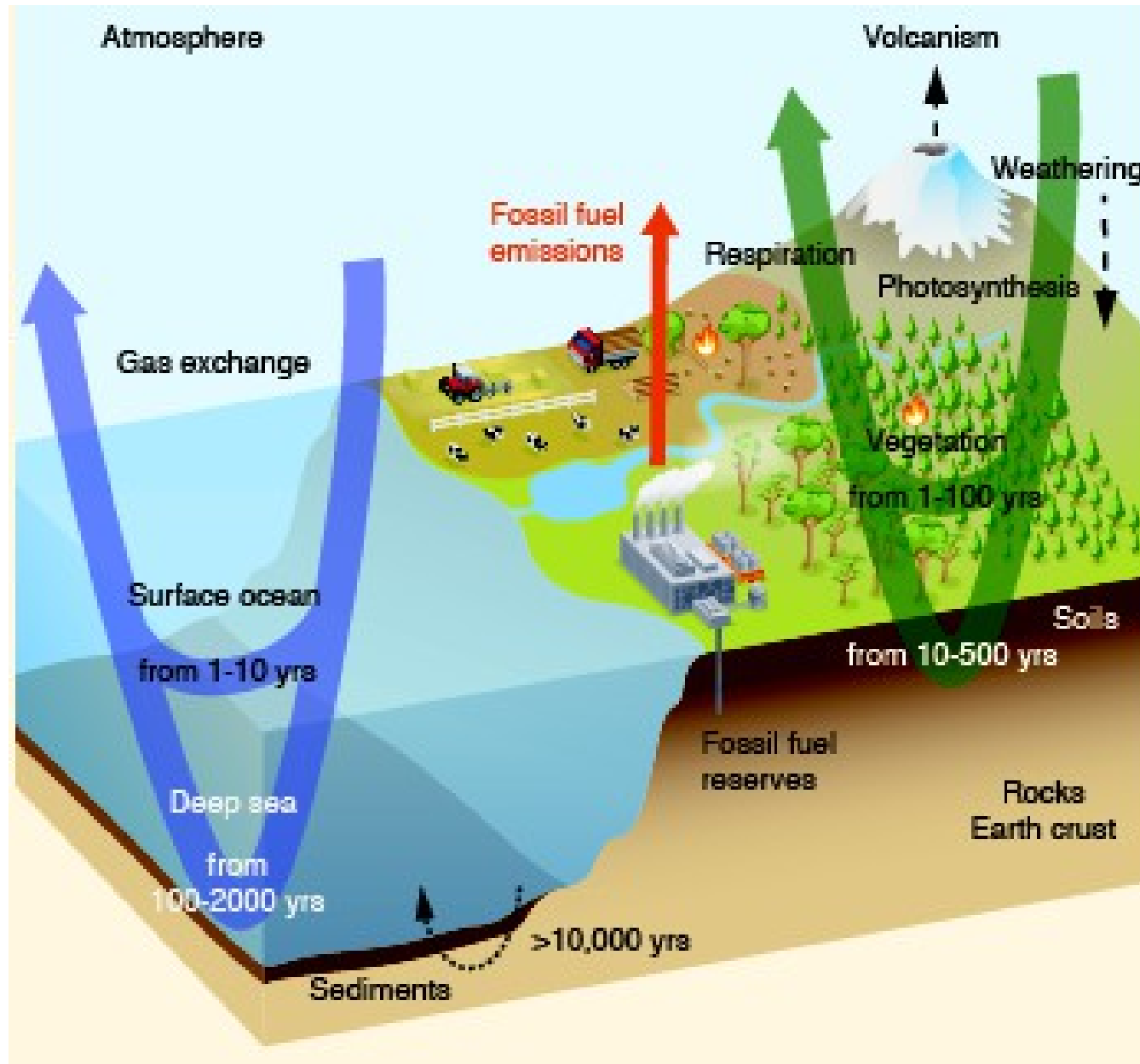


чёрный текст:
доиндустриальное
состояние

коричневый текст:
изменение от
доиндустриального
состояния к 2000-м гг.

потоки: Pg(C)/год
запасы: Pg(C)

Временные масштабы глобального углеродного цикла [IPCC, 2013]



Основные группы процессов земного углеродного цикла

2) 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).

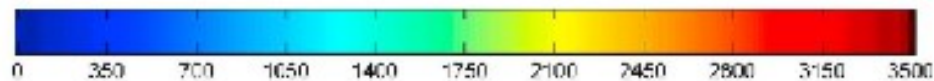
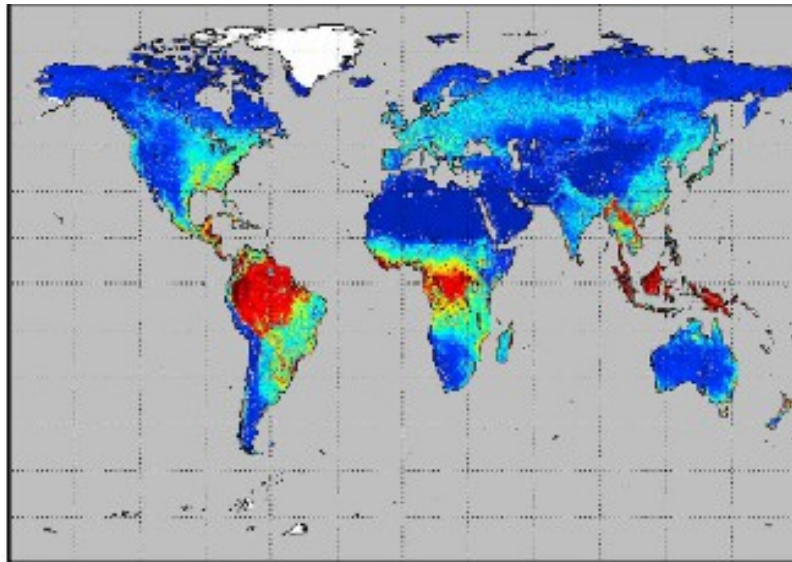
1) Океанический углеродный цикл

- Solubility pump (SP): Растворение CO_2 в морской воде и перенос океанической циркуляцией.
- Biological pump (BP): 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.
- 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).

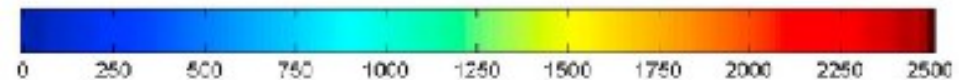
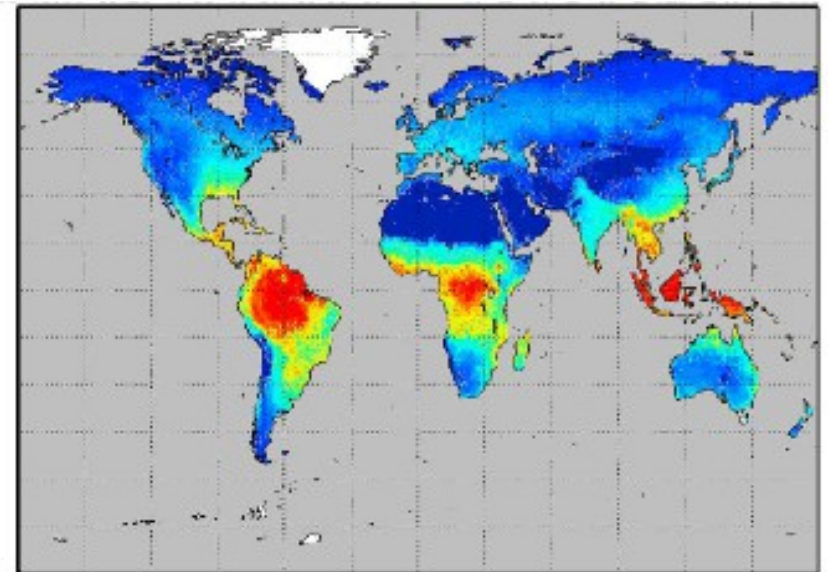
Наземный углеродный цикл

Спутниковые данные MODIS, 2001–2003 гг. [Ryu et al., 2012]

годовая интенсивность фотосинтеза
[гС м⁻²]



годовая эвапотранспирация
[мм год⁻²]

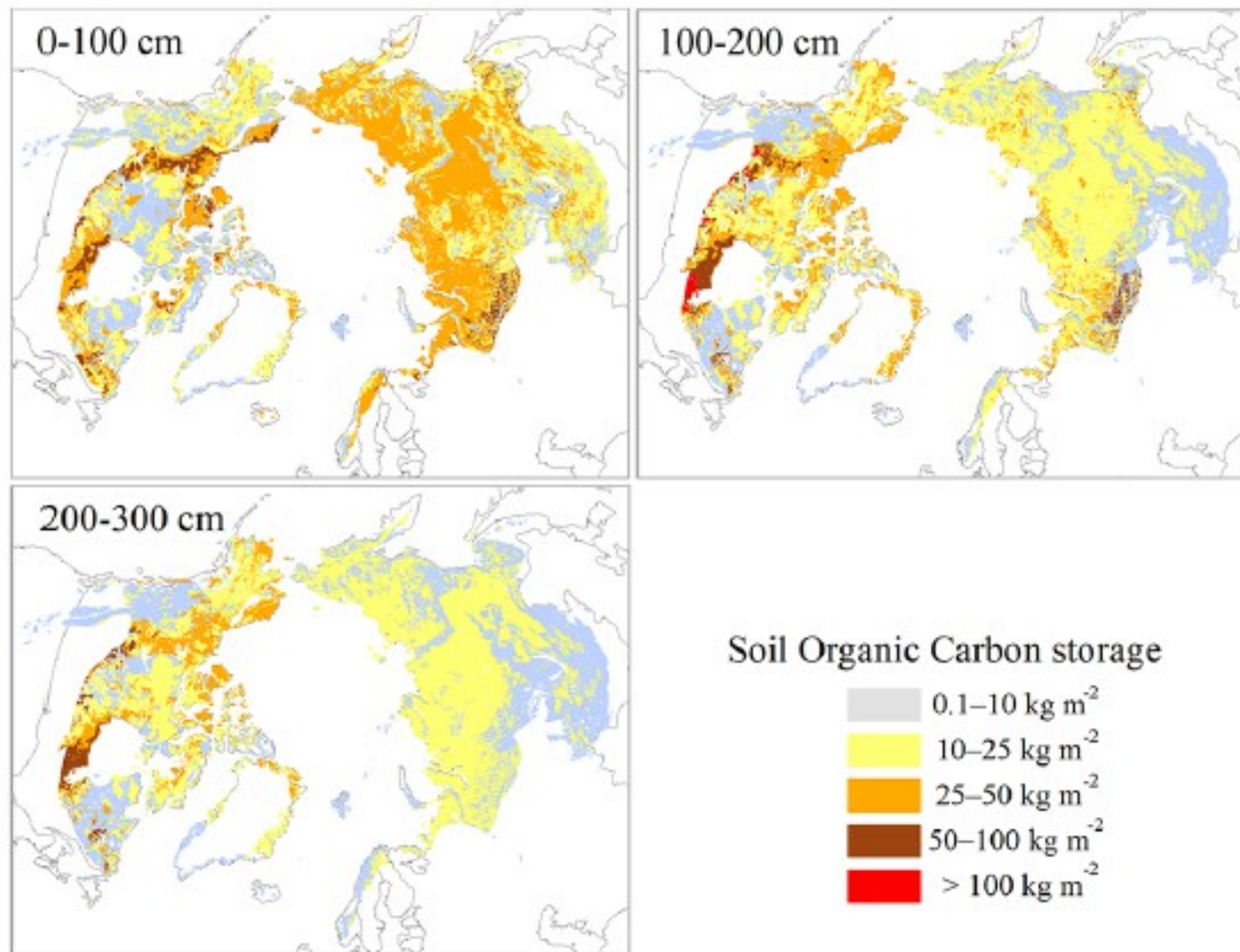


Поглощение CO₂ наземными экосистемами [Le Quere et al., 2013]

	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]

Запас углерода в почве, эмпирические оценки [Hugelius et al., 2013]

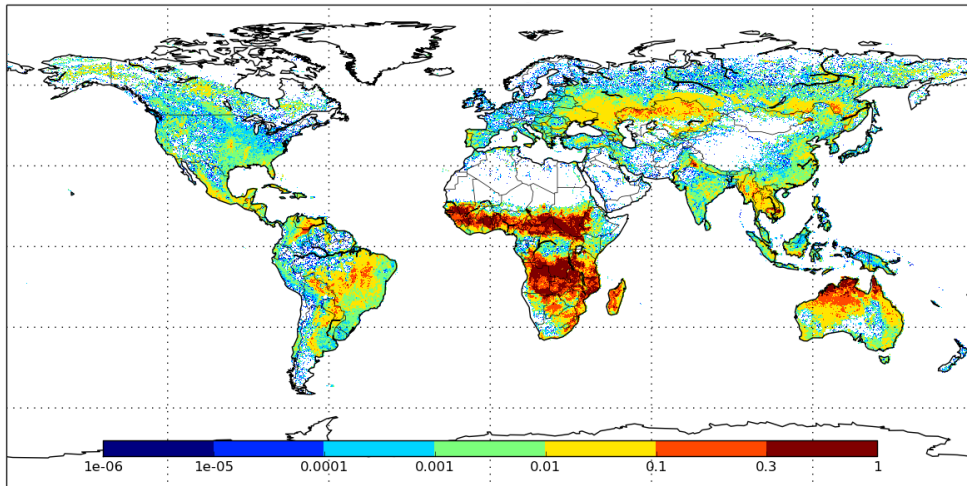


всего в указанных регионах: 1672 ПгС
глобально: 2344 ПгС [Jobbágy and Jackson, 2000]

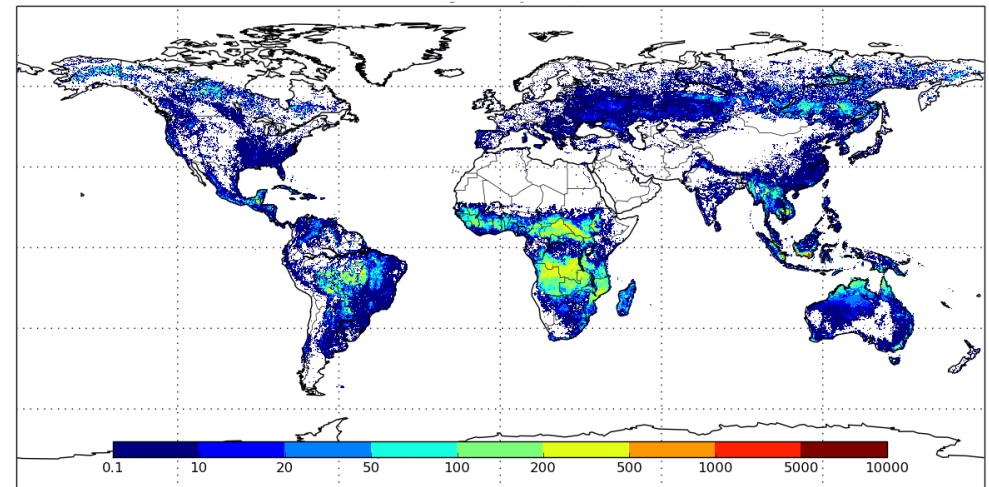
Природные пожары

Данные GFED-4, 1997–2013 гг.

площадь выгорания [доля ячейки]
(спутниковые восстановления)



эмиссии CO₂ [гС м⁻² г.⁻¹]
(модель CASA-TEM)



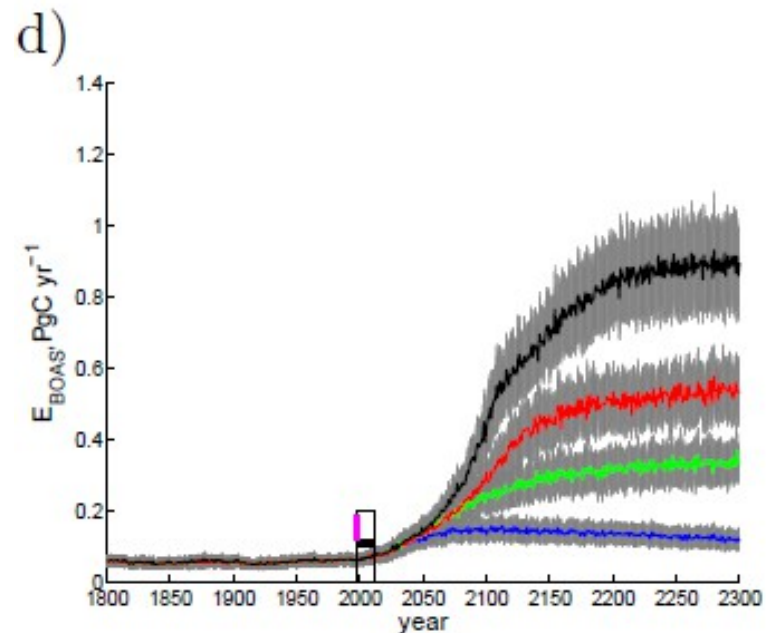
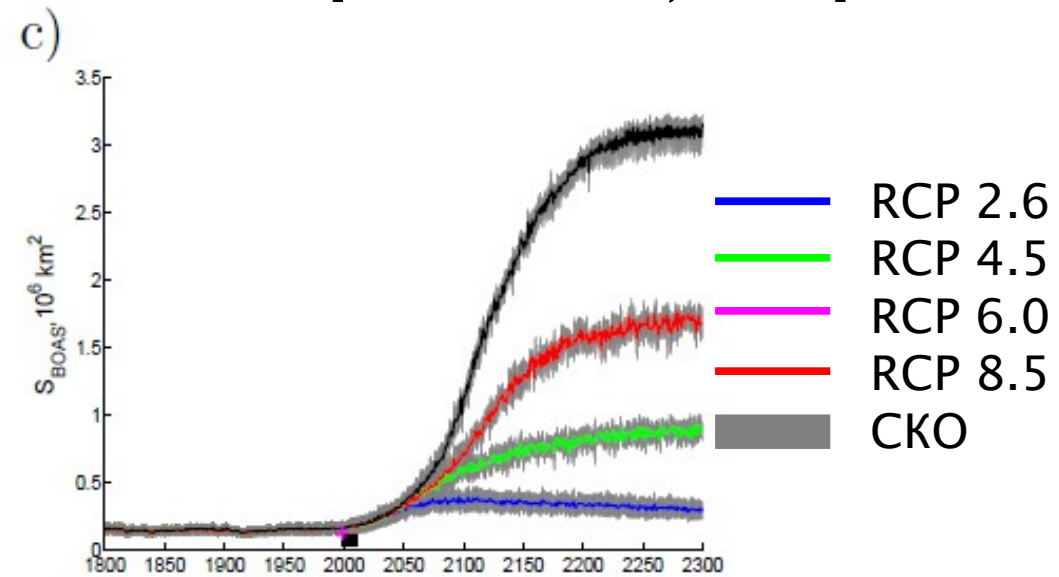
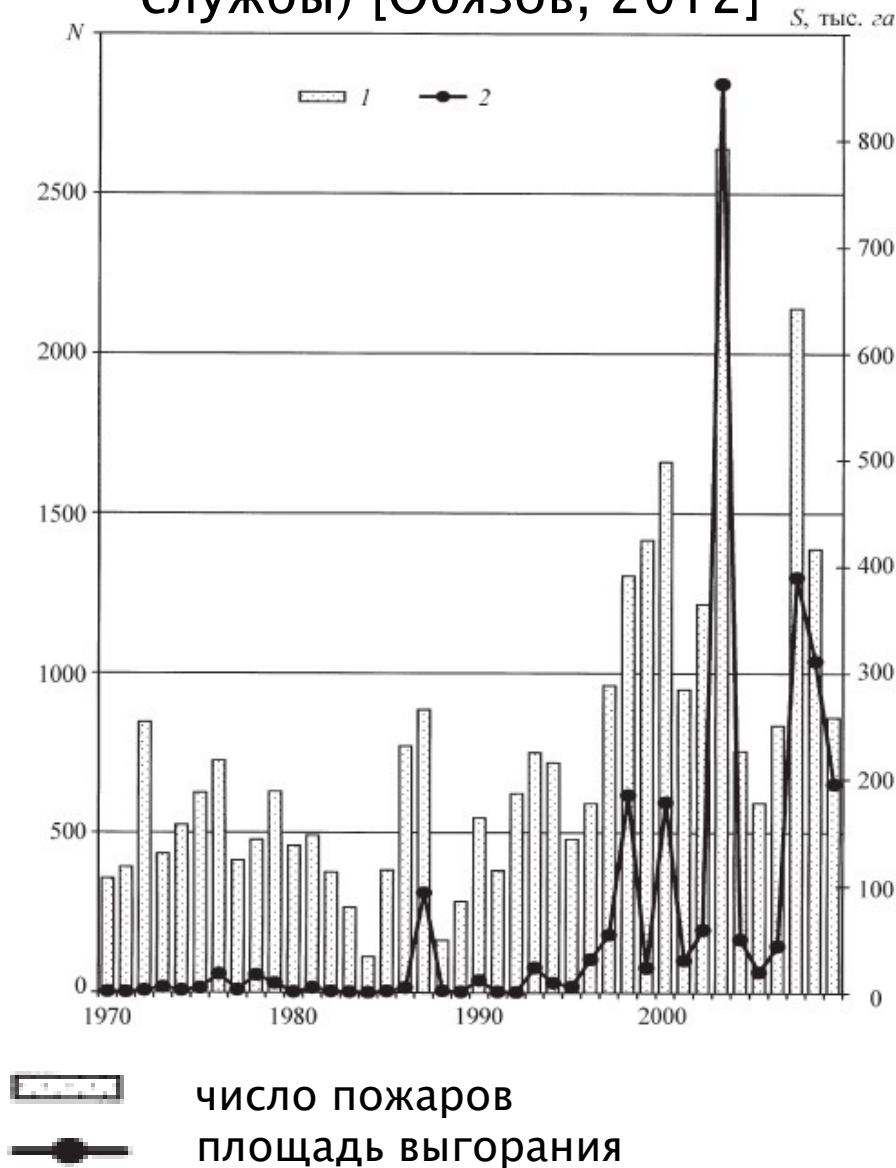
Эмиссии CO₂:
глобально: 1.4 ± 0.2 ПгС/год
BOAS: 0.12 ± 0.07 ПгС/год



Природные пожары: изменения

Забайкалье (данные
Государственной лесной
службы) [Обязов, 2012]

регион BOAS (КМ ИФА РАН)
[Eliseev et al., 2014]



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

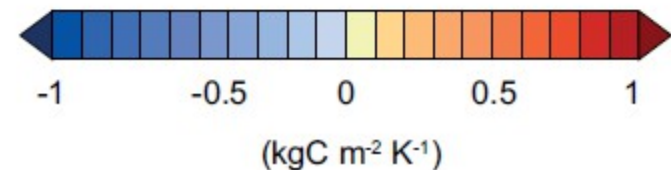
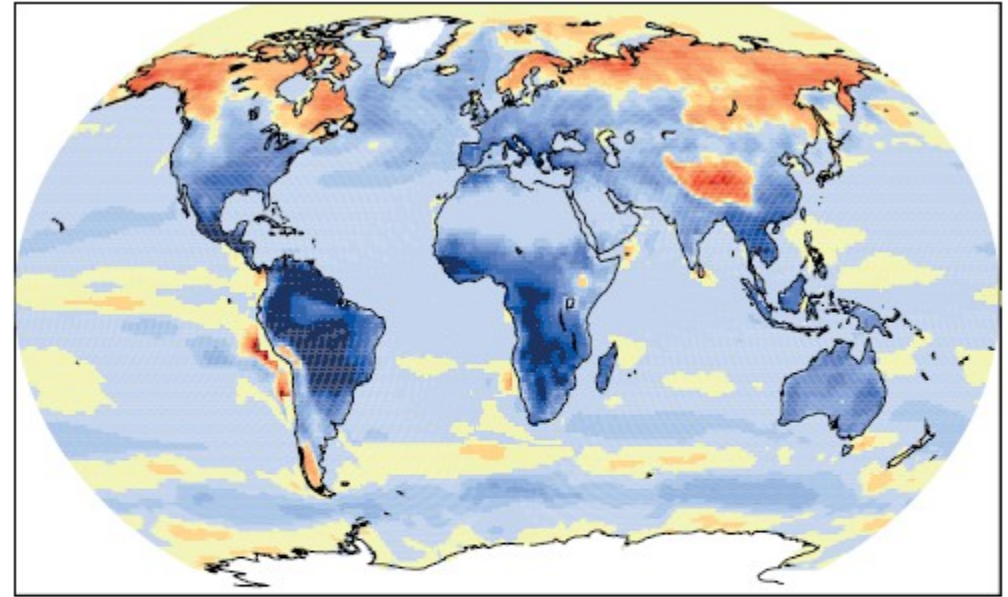
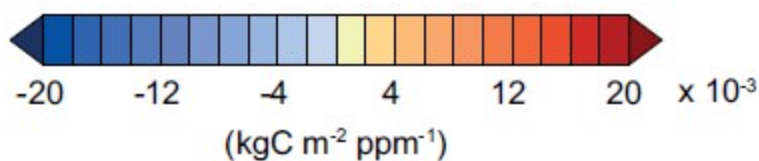
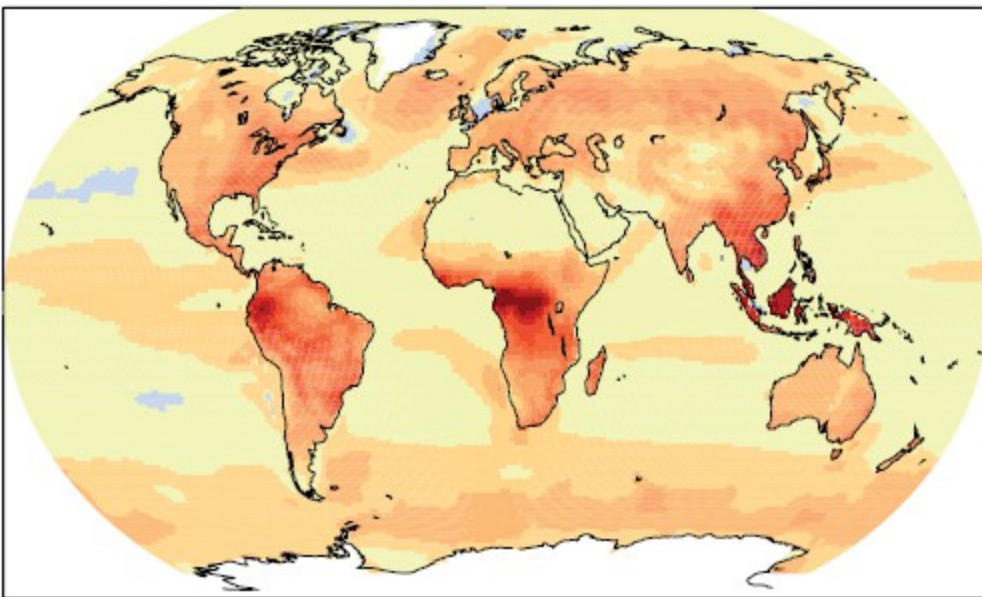
Ансамбль моделей, расчёты с увеличением q_{CO_2} на 1%/год в течение 140 лет.

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 $\partial U / \partial q_{\text{CO}_2}$

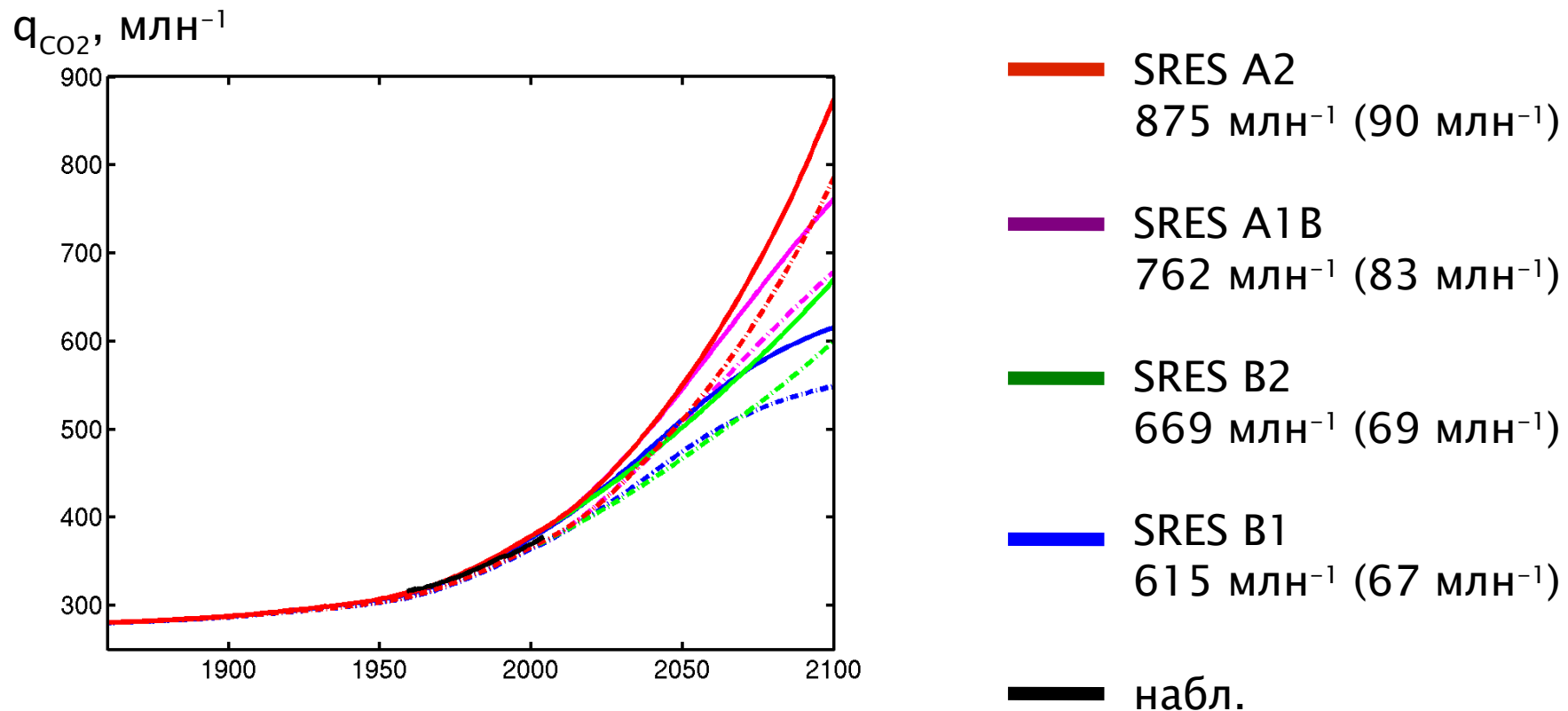
б) косвенный эффект $\partial U / \partial T_g$



Концентрация CO_2 в численных экспериментах с КМ ИФА РАН [Елисеев и др., 2008]

сплошные линии – полная модель

пунктир – версия модели, в которой изменения климата не влияют на углеродный цикл (но учитываются прямые эффекты увеличения q_{CO_2})

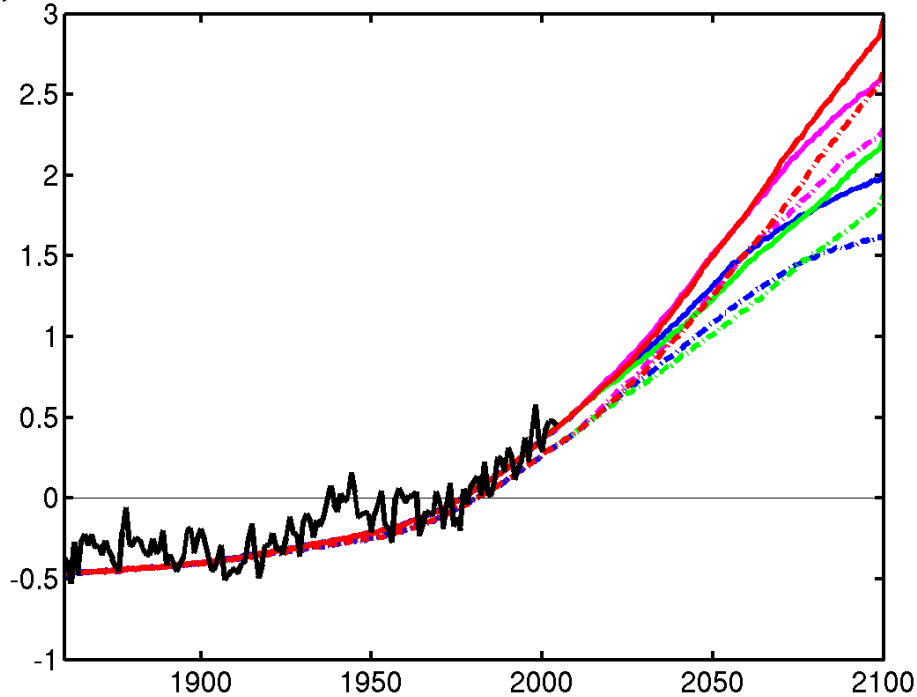


Изменение глобальной температуры в расчётах с КМ ИФА РАН

сплошные линии – полная модель

пунктир – версия модели, в которой изменения климата не влияют на углеродный цикл (но учитываются прямые эффекты увеличения q_{CO_2})

$\Delta T_g, \text{ K}$

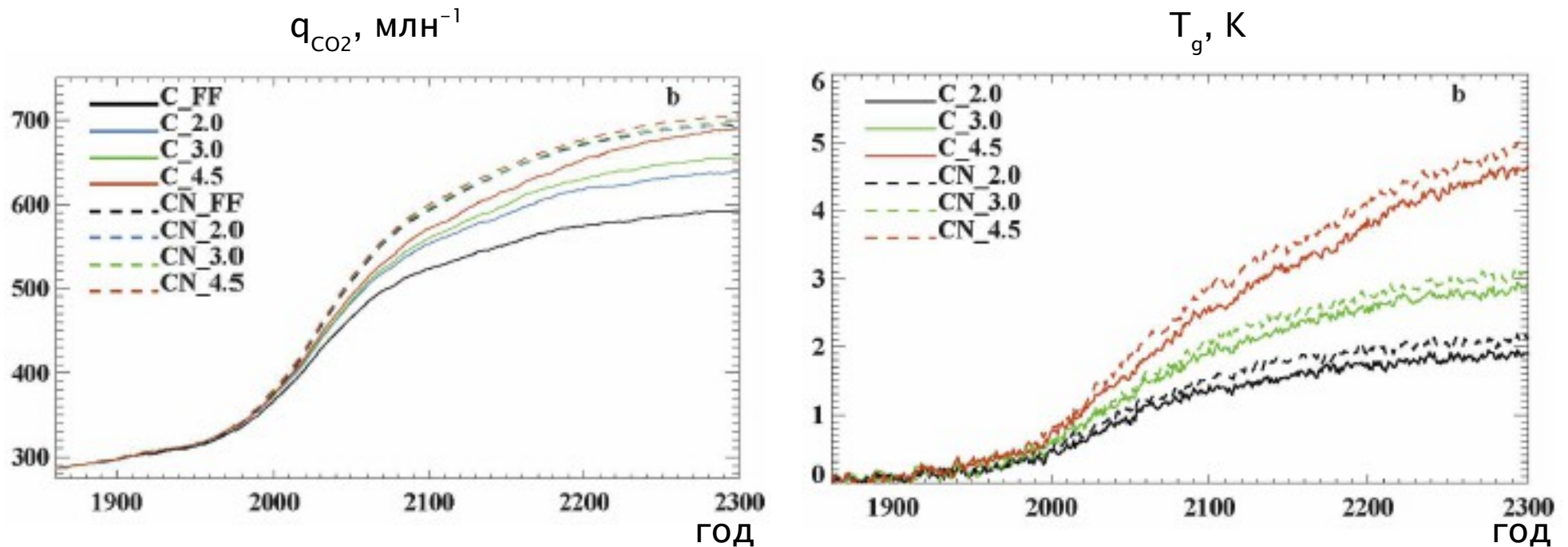


- SRES A2
3.38 K (0.31 K)
- SRES A1B
3.05 K (0.34 K)
- SRES B2
2.65 K (0.34 K)
- SRES B1
2.43 K (0.35 K)
- наблюдения
(CRU UEA)

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

Влияние азотного цикла на ОС между климатом и углеродным циклом

Численные эксперименты с климатической моделью MIT [Sokolov et al., 2008]
(идеализированный сценарий антропогенных эмиссий CO_2)



C — только углеродный цикл

CN — углеродный и азотный циклы

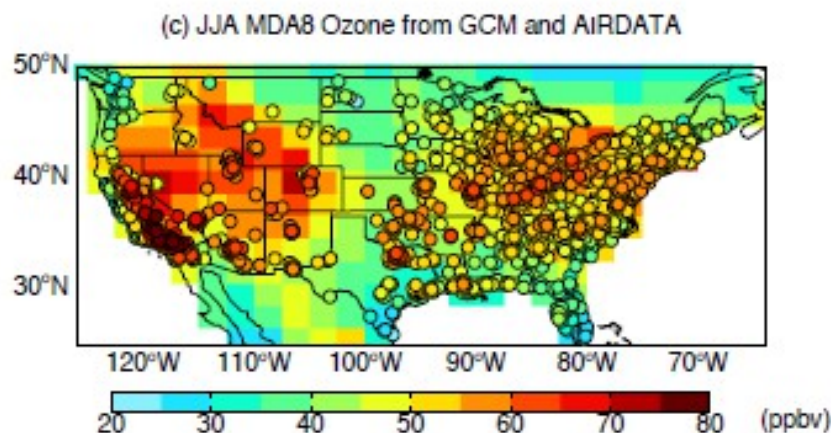
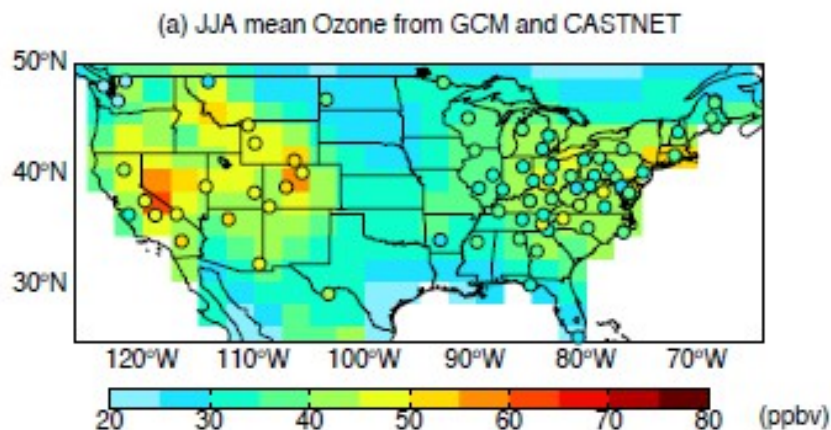
расчёты с версиями модели с разной чувствительностью климата к удвоению q_{CO_2}

Влияние атмосферных примесей на продуктивность наземных экосистем.

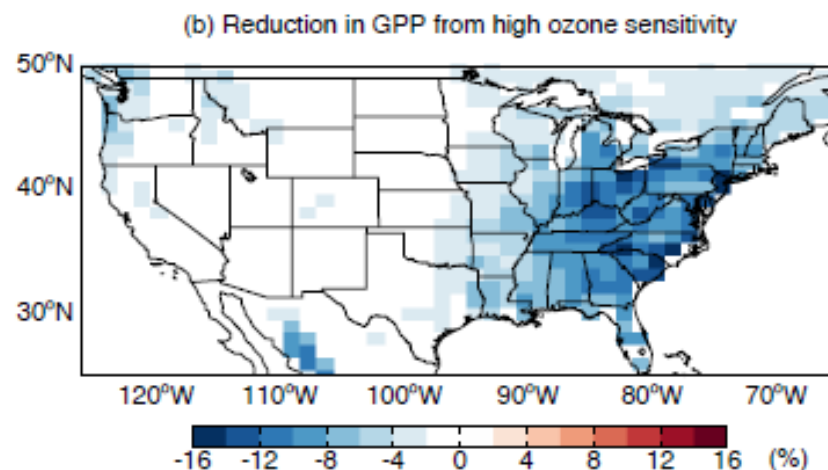
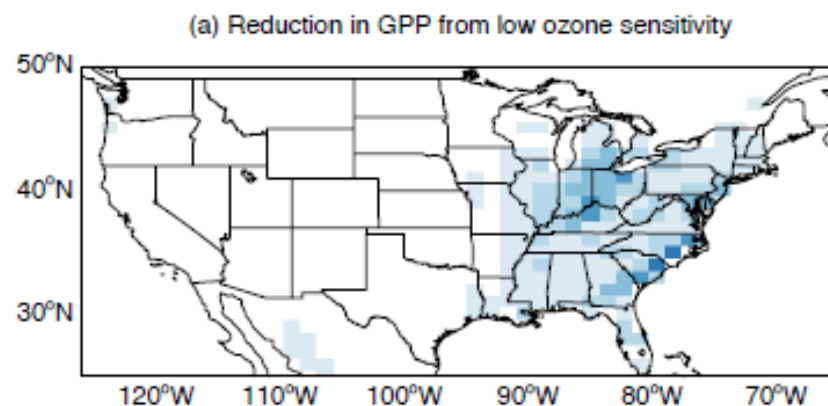
(1) Озон [Yue and Unger, 2014]

Расчёты с моделью YIBs, 1998–2007 гг.

Концентрация O_3 [млрд⁻¹] на уровне листвы (июнь–август)



Изменение полной первичной продукции из-за действия O_3 [%]

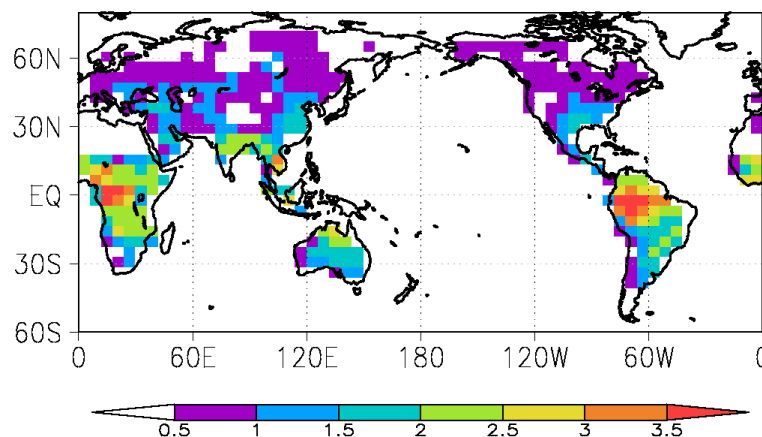


Влияние атмосферных примесей на продуктивность наземных экосистем.

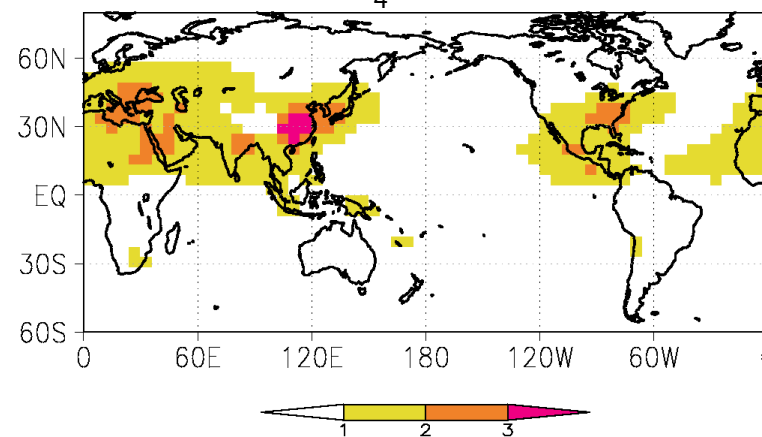
(2) Сульфаты [Eliseev, 2014]

Расчёты с КМ ИФА РАН, 2000–2010 гг.

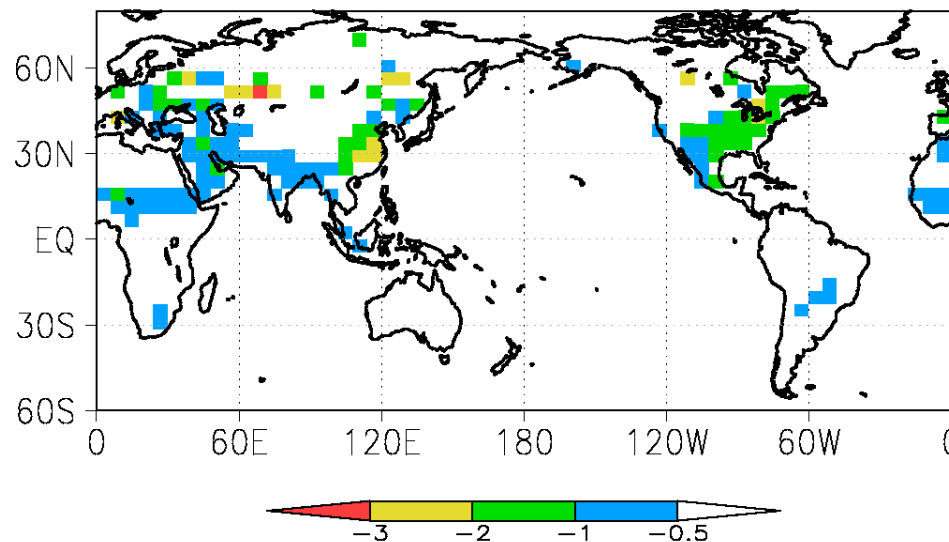
полная первичная продукция [$\text{кгС м}^{-2} \text{г.}^{-1}$]



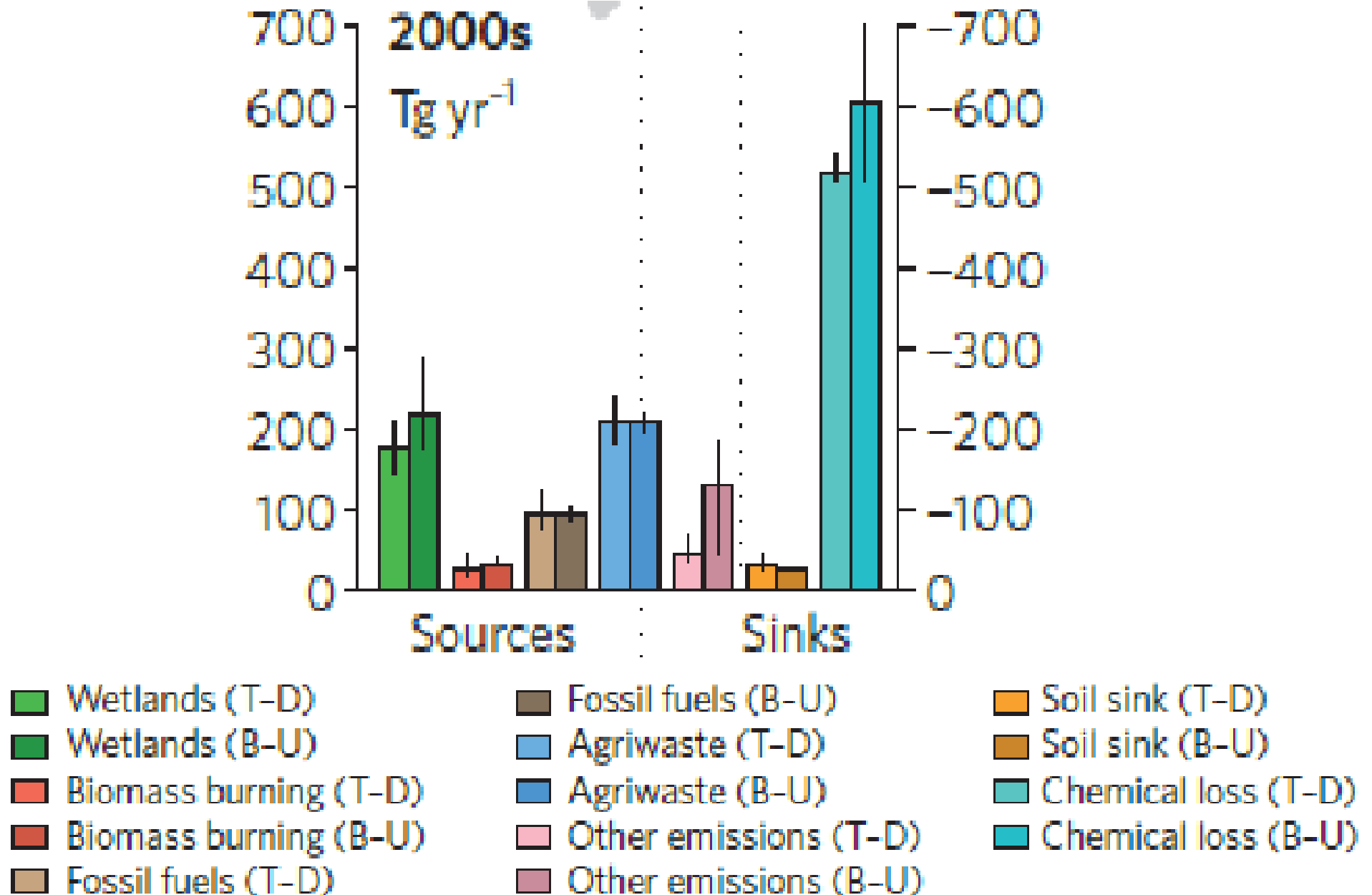
концентрация SO_4 у поверхности [млрд^{-1}]



изменение полной первичной продукции [%]



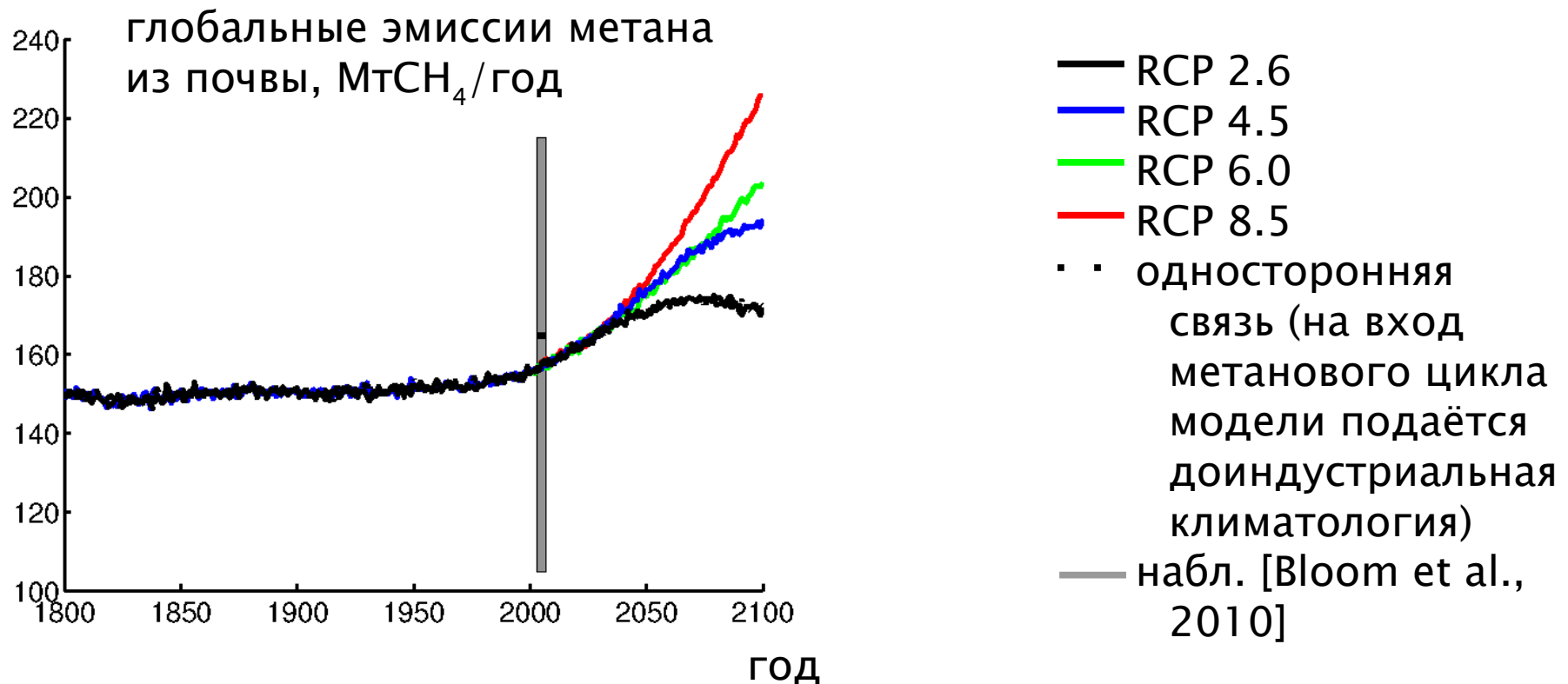
Интенсивность источников и стоков метана [Kirschke et al., 2013]



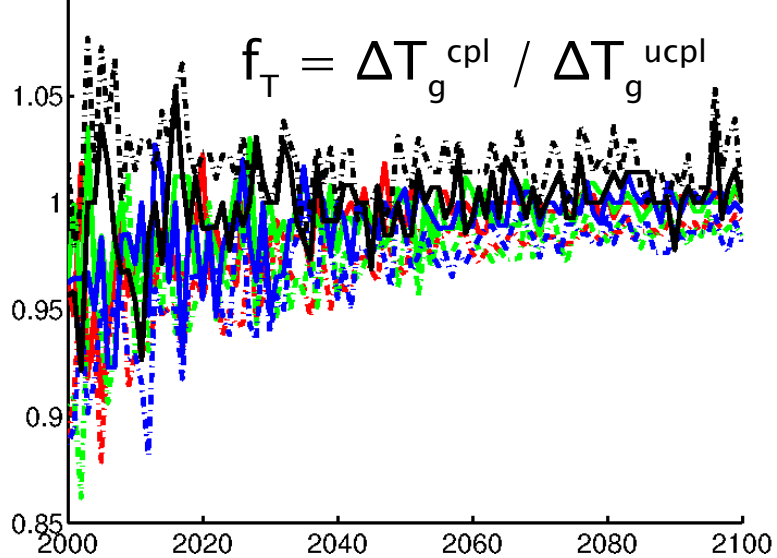
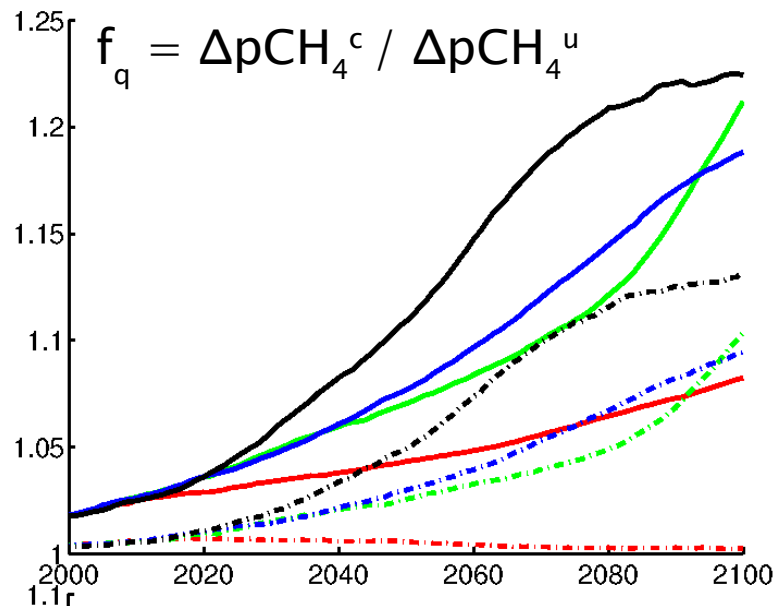
Результаты расчетов с КМ ИФА РАН [Денисов и др., 2013]

В КМ ИФА РАН также включен блок метанового цикла, учитывающий эмиссии метана из почв, насыщенной влагой.

С моделью проведены численные эксперименты в соответствии с условиями CMIP5 (с заданием антропогенных эмиссий CH_4 , а не его концентрации)



Результаты расчетов с КМ ИФА РАН



- RCP 2.6 сплошная линия:
- RCP 4.5 $\tau_a = \text{const}$
- RCP 6.0 штрихпунктир: функция Аррениуса
- RCP 8.5 $\tau_a \propto \exp(-k E_a / R)$

Отклик эмиссий метана из почвы на изменения климата увеличивает содержание CH_4 в атмосфере на 10–20%.

Однако различие глобально осредненной среднегодовой приповерхностной температуры атмосферы между расчетами с полной моделью и моделью с односторонней связью мало (< 0.05 K).

Аналогичные результаты получены и с моделью общей циркуляции ИВМ РАН.

Аналогичный отклик в модели IMOGEN (Центр Хэдли, Великобритания) значим (до 0.2 K). Эта модель характеризуется высокой чувствительностью к парниковому форсингу.

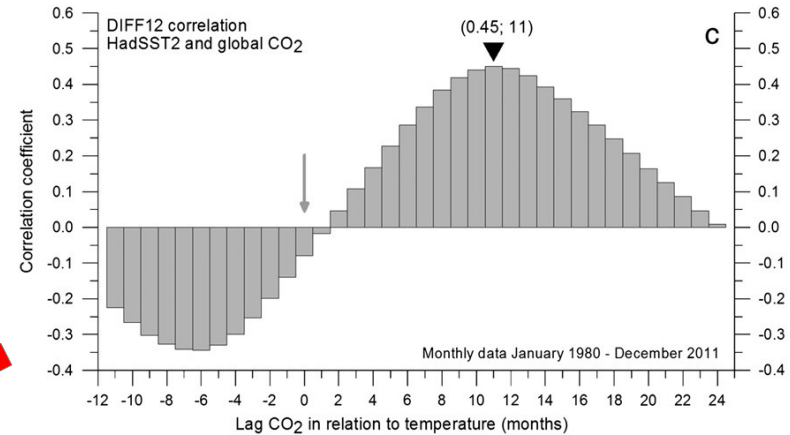
Связь между T_g и q_{CO_2}

Последние 420 тыс. лет
[Мохов и др., 2005]

Таблица 1. Результаты взаимного корреляционного анализа различных переменных по данным для антарктической станции Восток за последние 420 тыс. лет

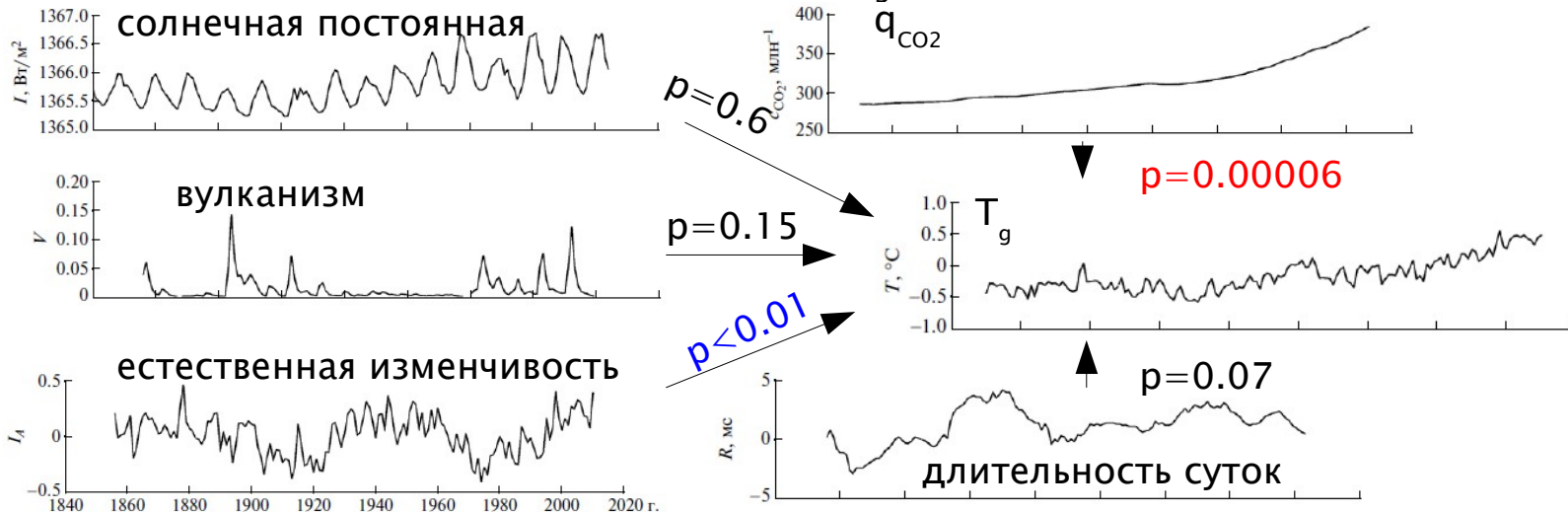
Сдвиг Δt , тыс. лет, коэффициент корреляции r , коэффициент регрессии B (СКО коэффициента регрессии)	ΔT [K]	CO_2 [ppmv]	CH_4 [ppbv]
ΔT [K]		-1	-0.5

Последние 20 лет
[Hunlum et al., 2013]



T_g запаздывает относительно q_{CO_2} !

Статистическая модель влияния внешних воздействий (причинность по Грейнджеру) на изменение T_g , 1850–2010 гг. [Мохов и др., 2012]



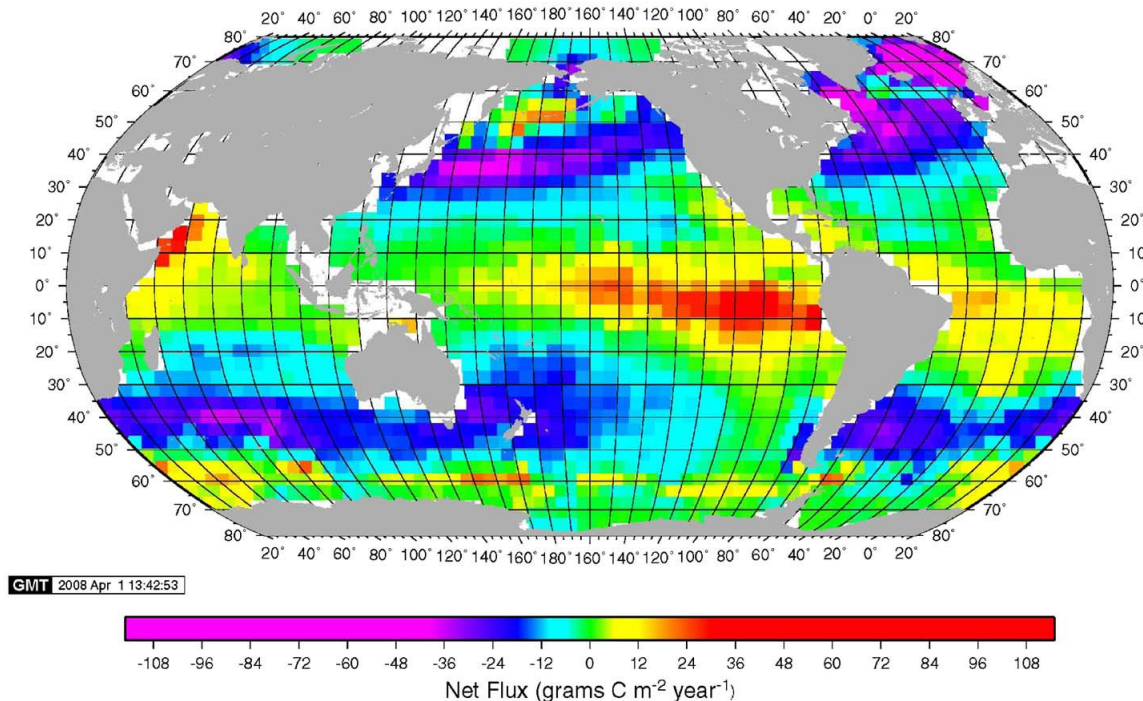
Доминирует эффект q_{CO_2} при важном вкладе естественной изменчивости

Заключение

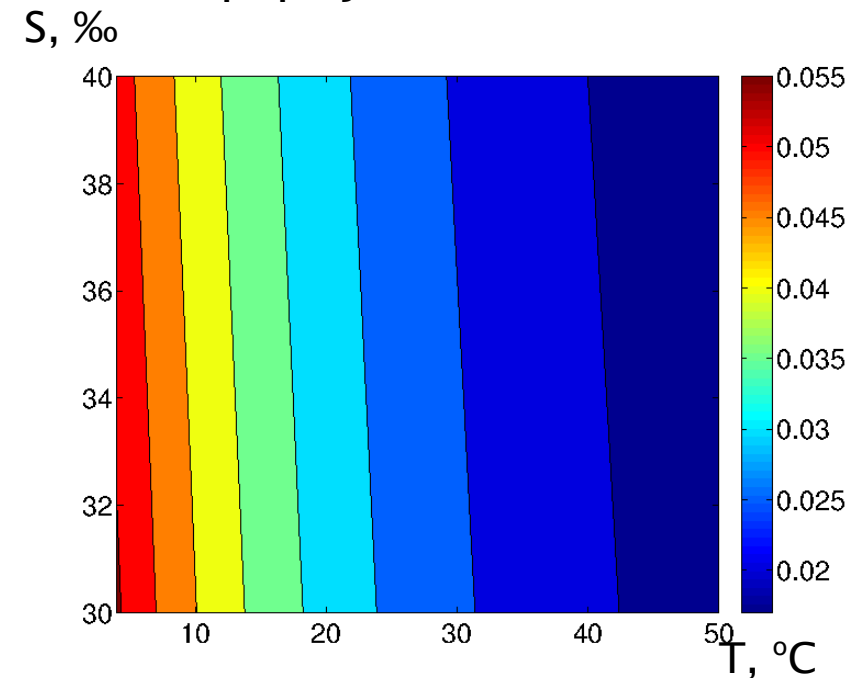
- Основные типы взаимодействия между климатом и экосистемами – биогеофизические и биогеохимические
- **Биофизическое воздействие изменения альbedo за счет дефорестации приводит к радиационному форсингу относительно доиндустриального периода $0.2 \pm 0.2 \text{ Вт/м}^2$ (~10% от полного) и охлаждению климата на 0.1–0.2 К.**
- Влияние дефорестации на изменение транспирации в анстоящее время изучено недостаточно.
- **В ряде регионов биогеофизическое взаимодействие может приводить к резкому изменению состояния климата и экосистем.**
- Прямые эффекты роста концентрации CO_2 в атмосфере на интенсивность углеродного цикла (фертилизация для наземных экосистем и газоперенос между атмосферой и океаном) стабилизируют систему (отрицательная ОС). Соответствующие косвенные (климатические) эффекты приводят к положительной ОС
- **Учёт биогеохимических ограничений между климатом и углеродным циклом увеличивает отклик климата на антропогенные эмиссии CO_2 .**
- Взаимодействие климата и метанового цикла существенно увеличивает содержание метана в атмосфере (положительная ОС), но отклик климата при её учёте существенно не меняется.
- **Связь между температурой и q_{CO_2} зависит от временных масштабов и типа воздействия.**

Морской неорганический углеродный цикл

Среднегодовой поток CO_2 от океана к атмосфере, 2000–е гг. [Takahashi et al, 2009]



Растворимость CO_2 в морской воде [моль кг⁻¹ атм⁻¹] (формула [Weiss, 1974])

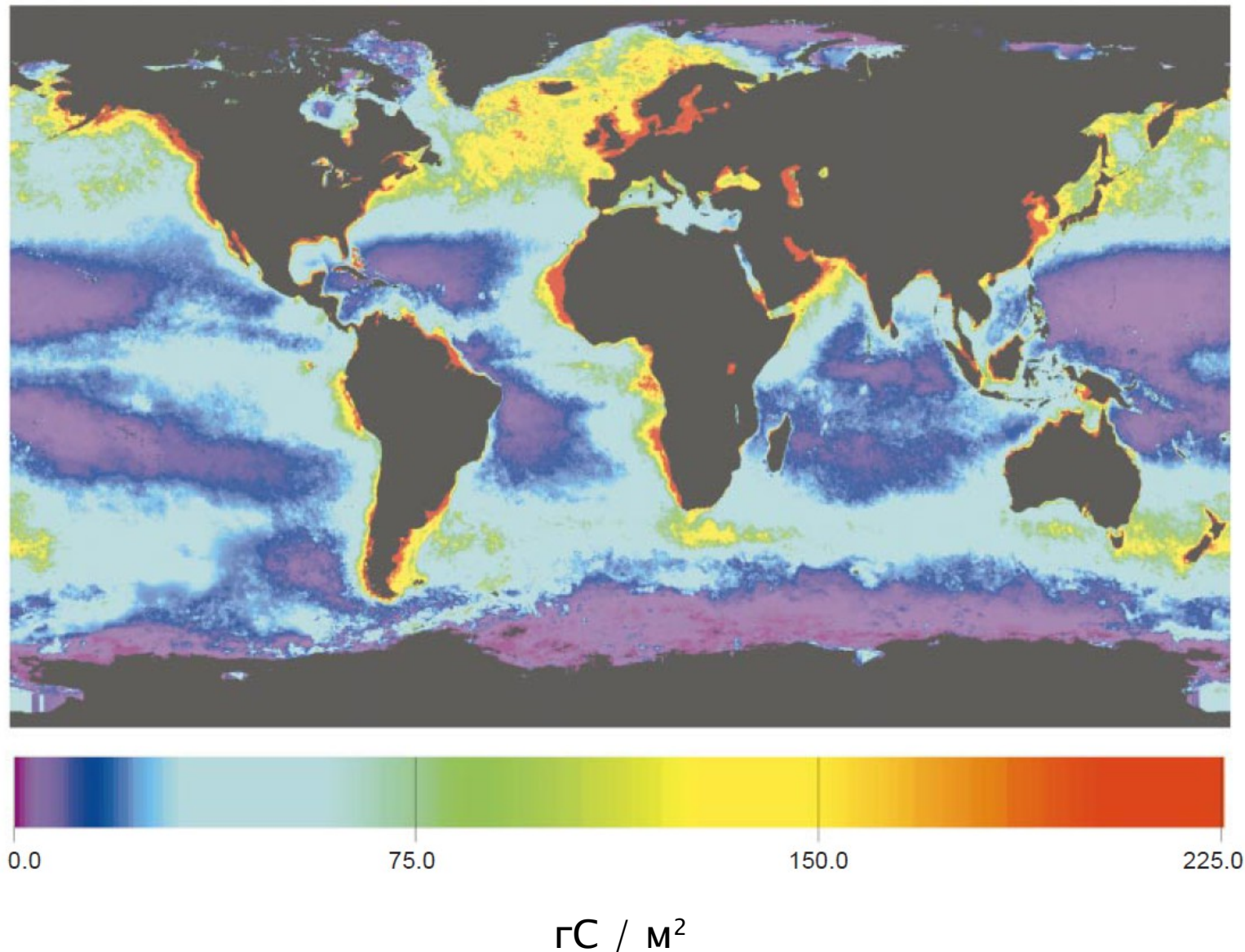


Поглощение CO_2 океаном [Le Quere et al., 2013]

	mean (PgC yr ⁻¹)					
	1960–1969	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2002–2011
Ocean sink (S_{OCEAN})	1.2 ± 0.5	1.5 ± 0.5	1.9 ± 0.5	2.2 ± 0.4	2.4 ± 0.5	2.5 ± 0.5

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

Интенсивность годового потока экспорта органического углерода [Falkowski et al., 1998]

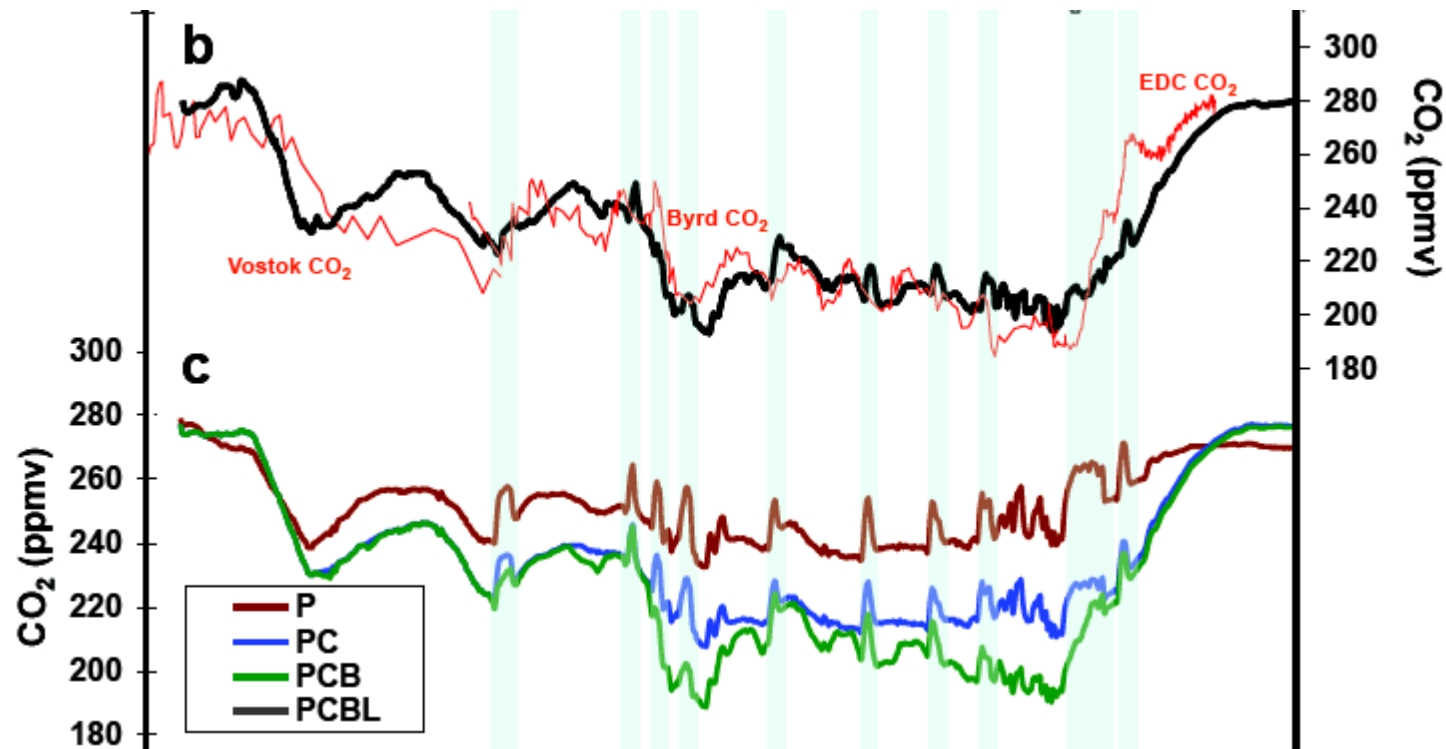


суммарная
интенсивность:
 ≈ 45 ПгС/год;

в стационарном
приближении
она должна
быть равна
годовой чистой
первичной
продукции
океана NPP_{oc} ;

интервал
модельного
 NPP_{oc} составляет
44–57 ПгС/год
[Carr et al.,
2006].

Углеродный цикл в ледниковые периоды [Brovkin et al., 2012]



P: изменение температуры океана, его циркуляции и уровня моря

PC: P + неорганическая химия океана

PCB: PC + фертилизация океанических экосистем железом (минеральной пылью)

PCBL: PCB + процессы в наземных экосистемах

— данные ледового бурения