

Глобальный цикл метана

А.В. Елисеев

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова
ИФА им. А.М. Обухова РАН
Казанский (Приволжский) федеральный
университет

семинар ИГКЭ 25.10.2017

Роль цикла метана в земной системе

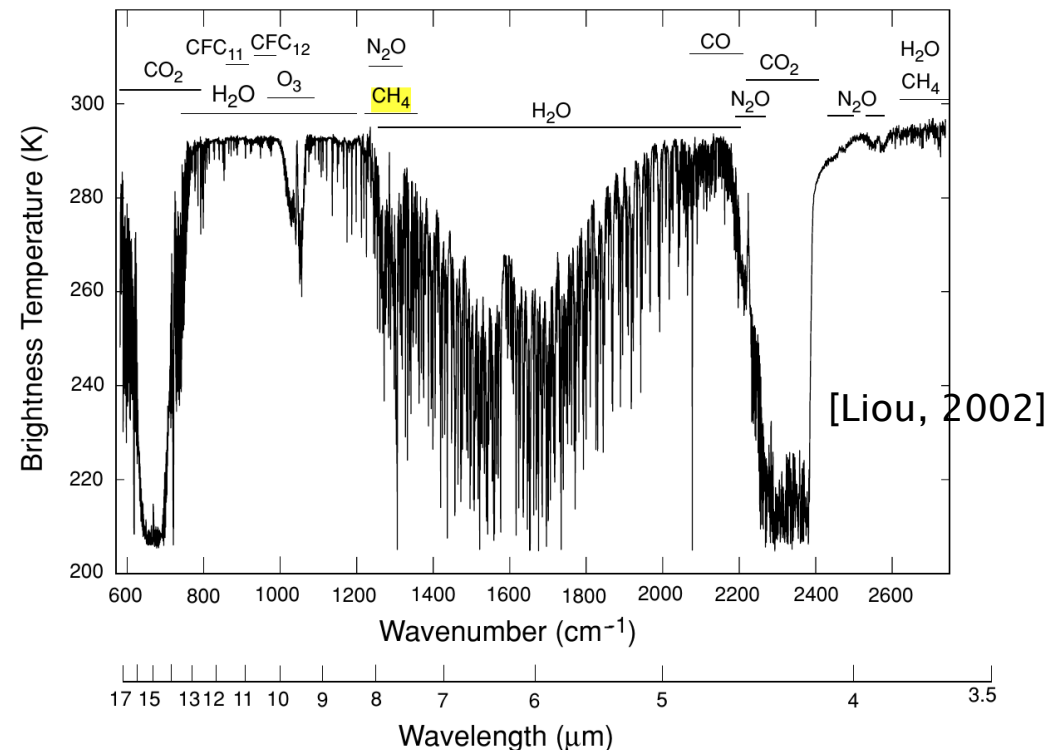
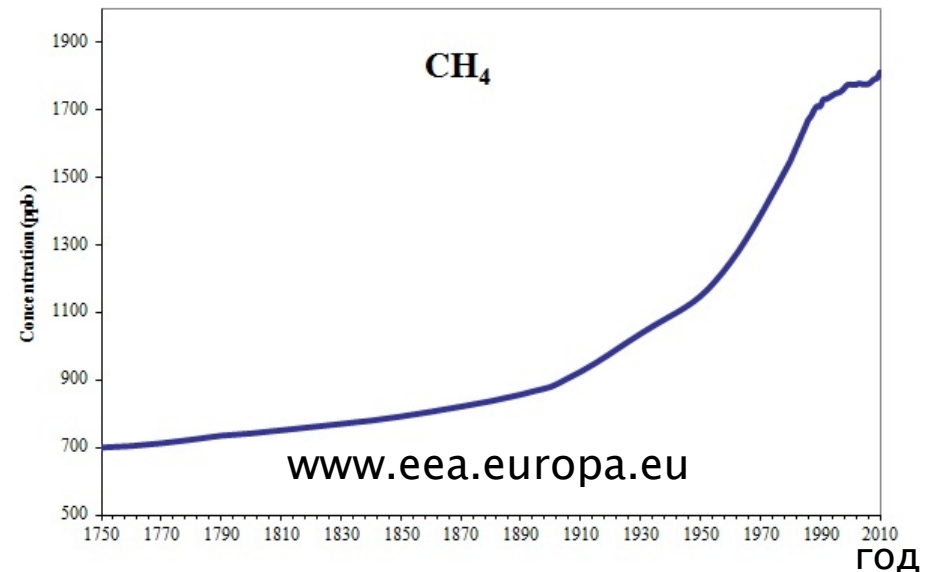
– МЦ – часть углеродного цикла
Однако ряд особенностей
позволяют выделить его в
отдельный биогеохимический
цикл

Взаимодействует с другими
геохимическими циклами

– За индустриальный период
 q_{CH_4} увеличилась в 2.5 раза

– Характеристики МЦ зависят от
состояния климата

– Влияет на перенос радиации в
атмосфере
(сечение поглощения ДВ-
радиации в 20–25 раз больше,
чем для CO_2)



Происхождение метана [Cicerone, Oremland, 1988; Kirschke et al., 2013]

– биогенный

формируется бактериями и археями почвы из органического субстрата

$$\delta^{13}\text{C} = -(60-110)\text{‰}$$

$$\delta\text{D} > -275\text{‰}$$

– термогенный

образуется при высокотемпературных ($\geq 110^\circ\text{C}$) реакциях в земной коре, связанных с образованием нефти

возможно выделение в атмосферу через геологические структуры (напр. разломы) и при транспортировке углеводородов

$$\delta^{13}\text{C} = -(25-55)\text{‰}$$

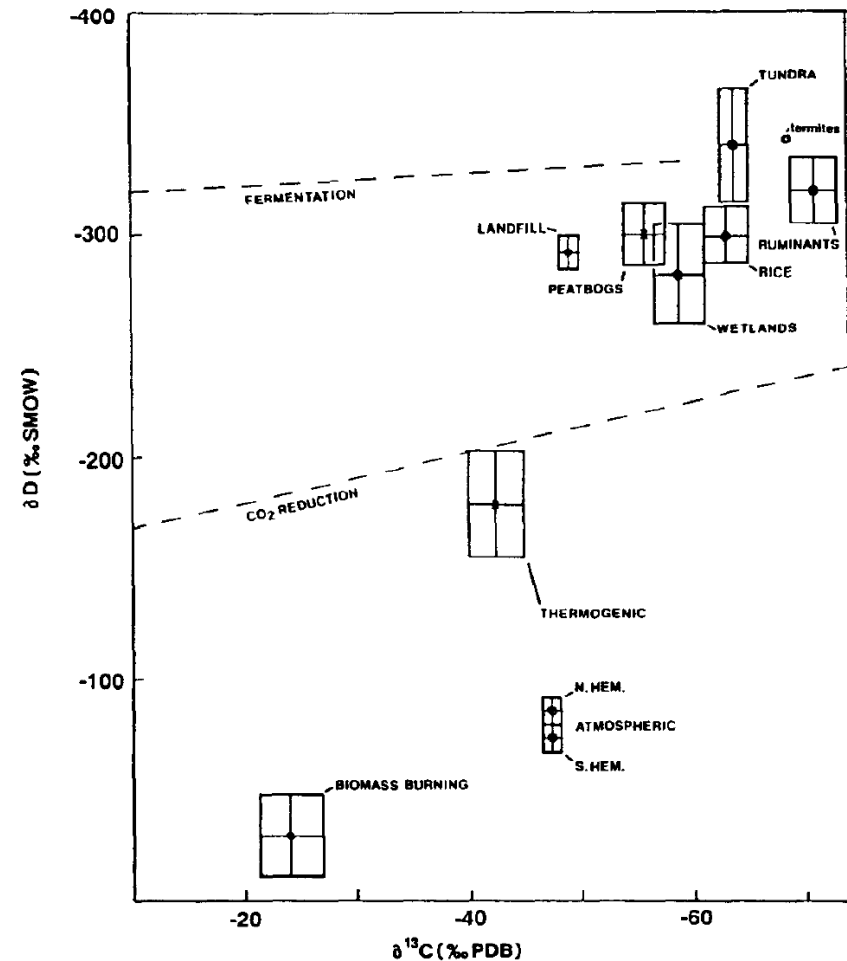
$$\delta\text{D} < -150\text{‰}$$

– пирогенный

образуется при неполном сгорании биомассы (в том числе биотоплива) и ископаемого топлива

$$\delta^{13}\text{C} = -(15-25)\text{‰}$$

[Wahlen, 1993]



Общие сведения о цикле метана: источники

Интенсивность источников: подходы

– Прямой ("bottom-up approach"; BU)

Проведение прямых натурных измерений и обобщением их результатов на большой пространственный масштаб (вплоть до глобального).

- + : использование данных непосредственных измерений
- недостаточное покрытие поверхности измерениями, приводящее к неадекватному учёту пространственно-временной изменчивости

Предпочтителен на локальном пространственном масштабе

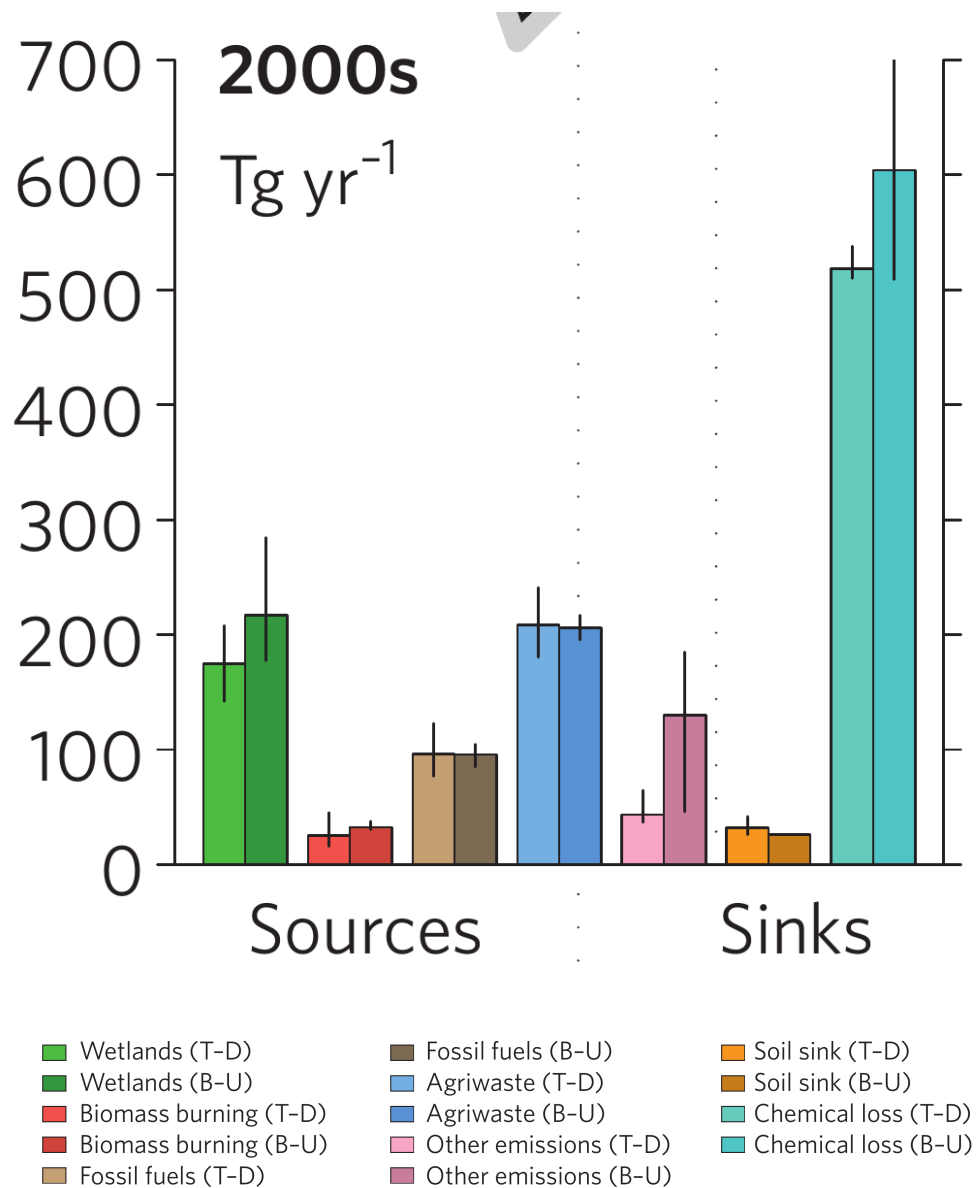
– Решение обратной задачи ("top-down approach"; TD)

Расчёты с моделями химических процессов в атмосфере с заданием метеорологических условия. Коэффициенты моделей оптимизируются для наилучшего согласия с доступными данными наблюдений

- + : выполнение фундаментальных законов сохранения (в том числе закона сохранения массы метана)
- : неопределённость метеорологических данных качеством моделей.

Предпочтителен на глобальном, континентальном и субконтинентальном масштабах

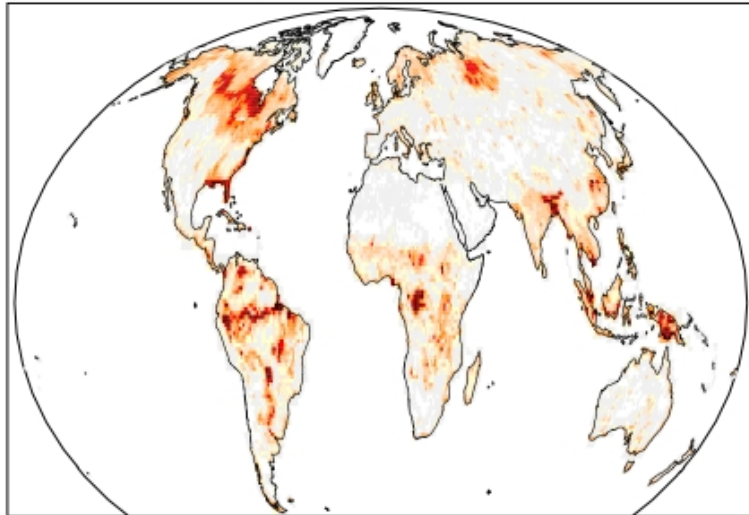
Источники метана [Kirschke et al., 2013]



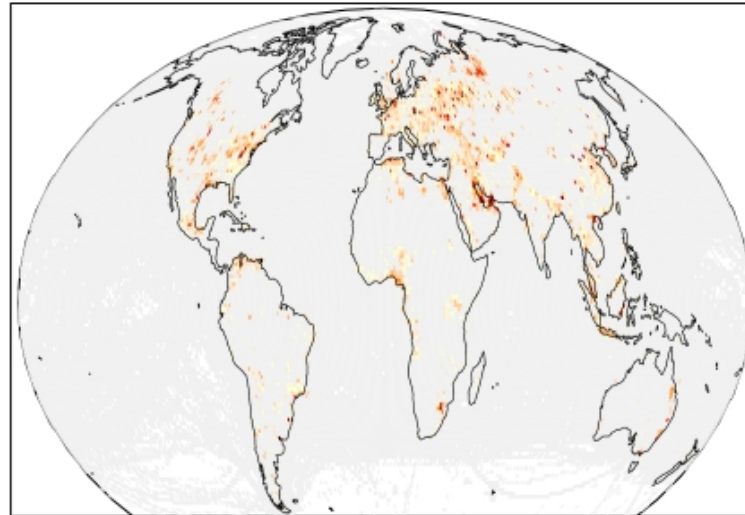
| | $\text{TgCH}_4/\text{год}$ | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|
| | 2000-2009 | |
| | Top-down | Bottom-up |
| Natural sources | 218 [179-273] | 347 [238-484] |
| Natural wetlands | 175 [142-208] ^{46,53,73,75,77,86} | 217 [177-284] ⁴⁰⁻⁴² |
| Other sources | 43 [37-65] ^{46,53,73,75,77} | 130 [61-200] |
| Fresh water (lakes and rivers) | | 40 [8-73] ^{31,32} |
| Wild animals | | 15 [15-15] ¹⁶ |
| Wildfires | | 3 [1-5] ^{16,47,55,88,89} |
| Termites | | 11 [2-22] ^{16,37,87,91} |
| Geological (incl. oceans) | | 54 [33-75] ^{35,55,90} |
| Hydrates | | 6 [2-9] ^{16,36,87} |
| Permafrost (excl. lakes and wetland) | | 1 [0-1] ⁵⁵ |
| Anthropogenic sources | 335 [273-409] | 331 [304-368] |
| Agriculture and waste | 209 [180-241] ^{46,53,73,75,77} | 200 [187-224] ^{55,56,81} |
| Biomass burning (incl. biofuels) | 30 [24-45] ^{47,53,72,73,75,77} | 35 [32-39] ^{47,78,80,89} |
| Fossil fuels | 96 [77-123] ^{46,53,73,75,77} | 96 [85-105] ^{55,56,81} |

Основные источники CH_4 , 2003–2012 гг. [Saunois et al., 2016]

Wetlands

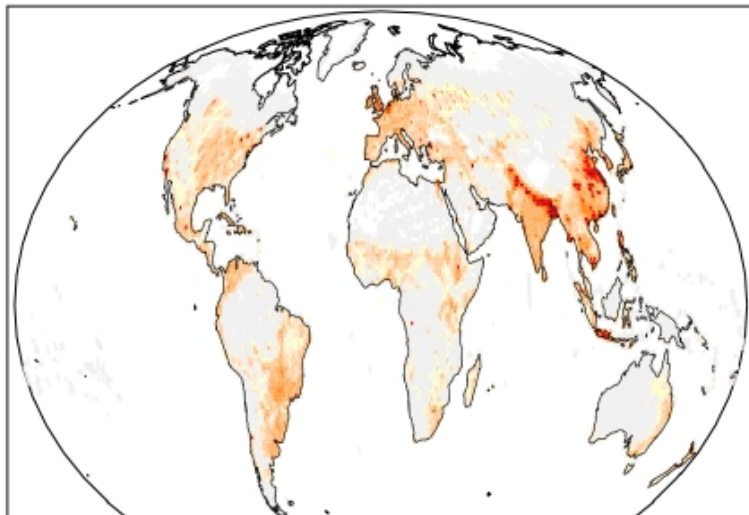


Fossil fuels

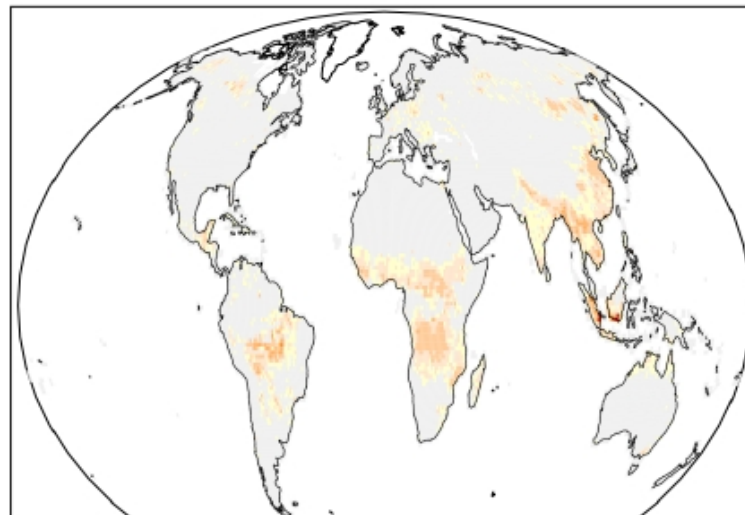


$\text{mg}(\text{CH}_4) \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

Agriculture & waste



Biom. & biof. burning



50.0

40.0

30.0

20.0

15.0

10.0

5.0

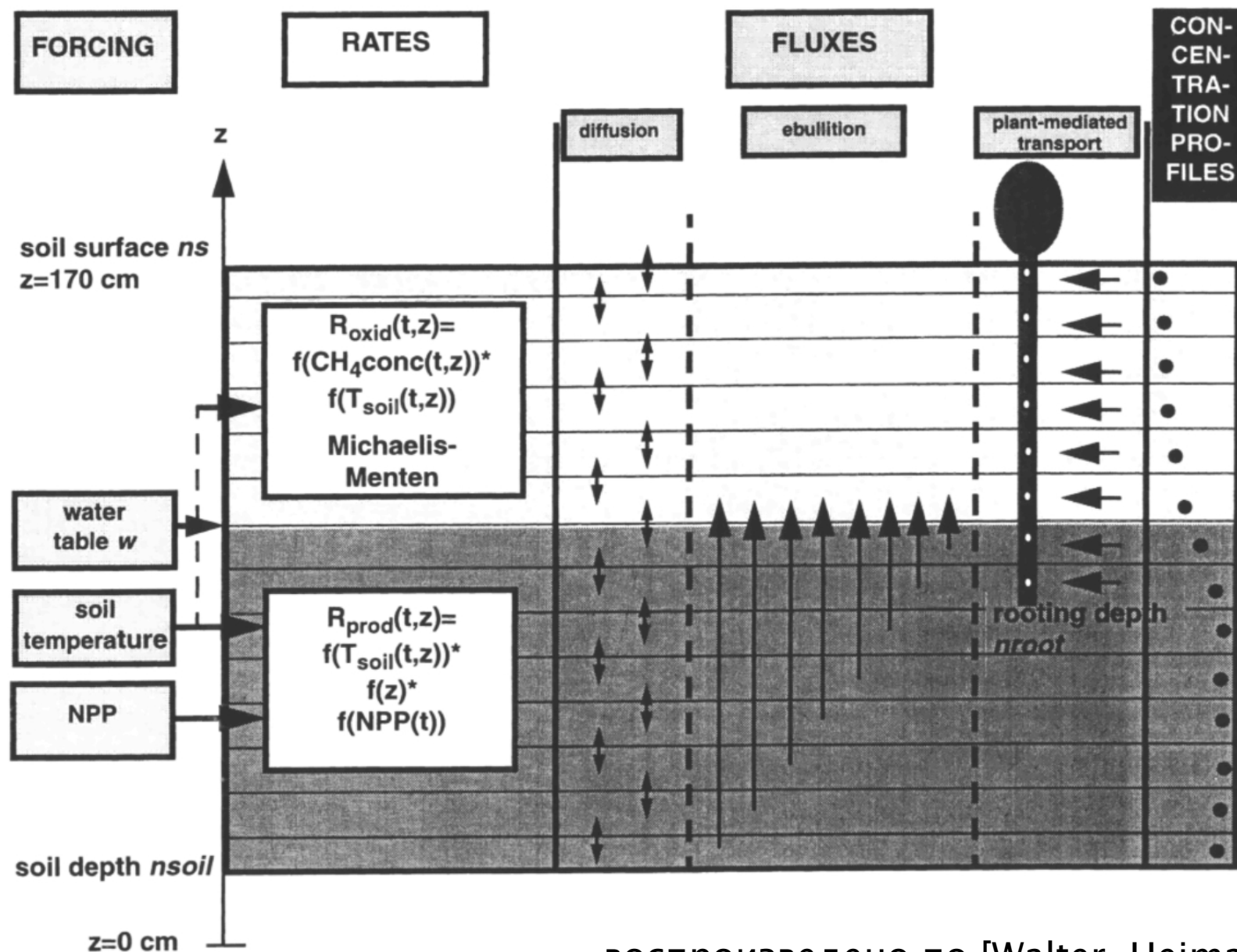
2.0

1.0

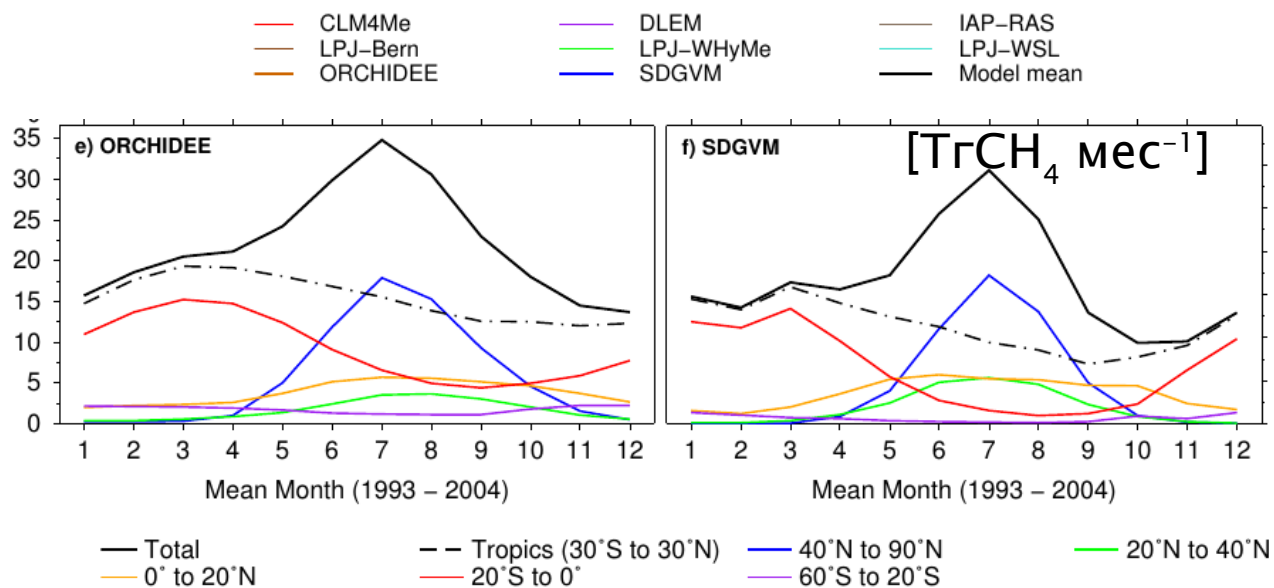
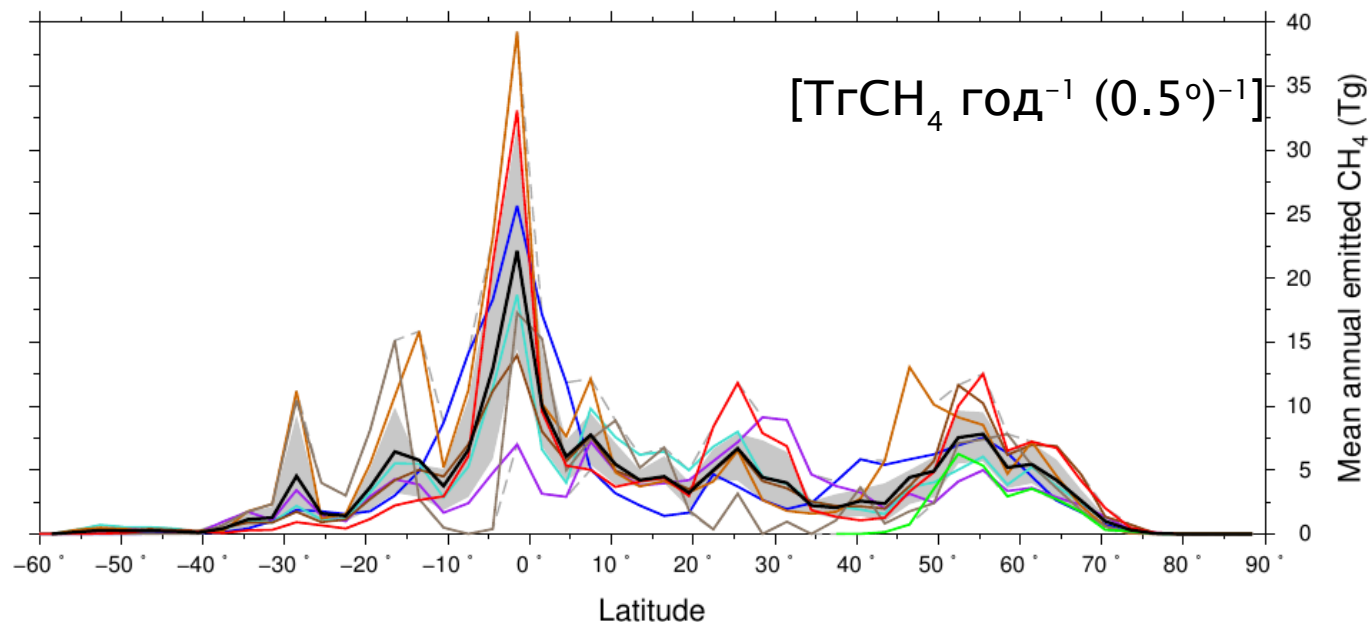
0.5

0.0

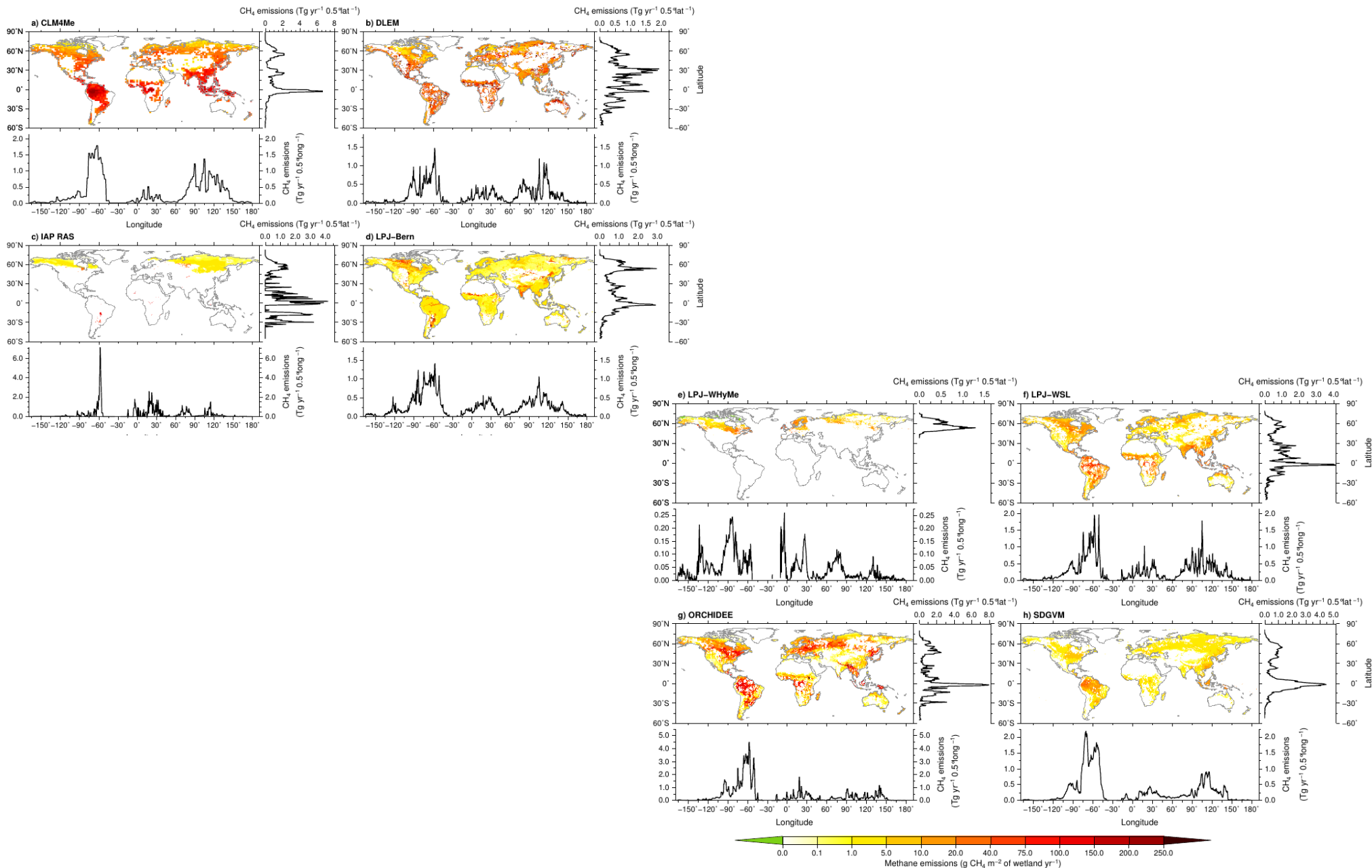
Интенсивность эмиссий от болот и влажной почвы: основные процессы



Интенсивность эмиссий от болот и влажной почвы: проект WETCHIMP, 1993–2004 гг. [Melton et al., 2013] (1)

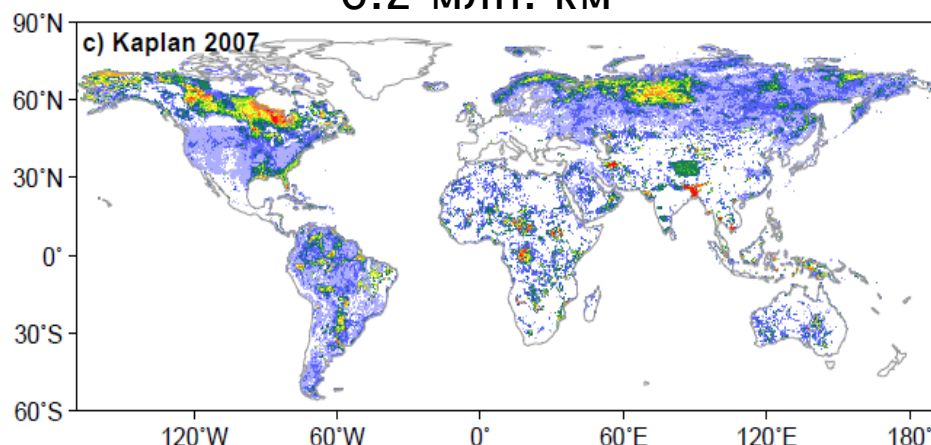


Интенсивность эмиссий от болот и влажной почвы: проект WETCHIMP, 1993–2004 гг. [Melton et al., 2013] (2)

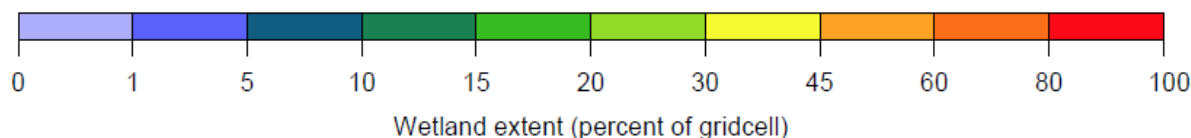
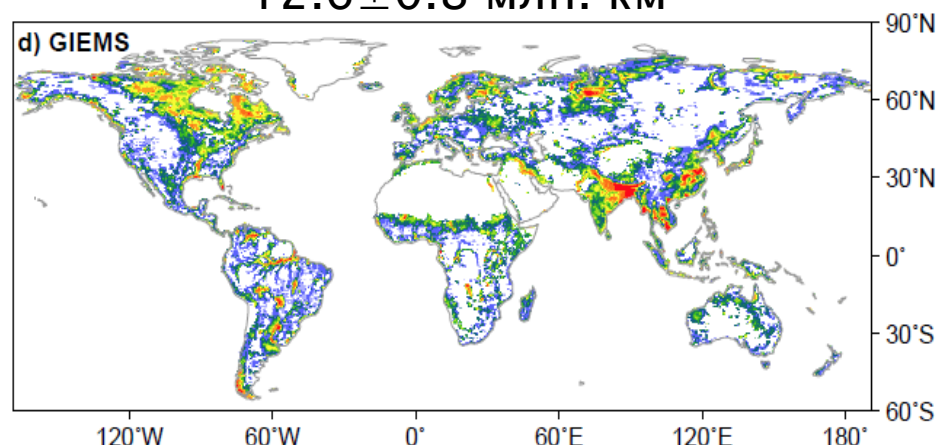


Неопределённость данных о площади влажных экосистем

спутниковые данные
о типах экосистем:
6.2 млн. км²



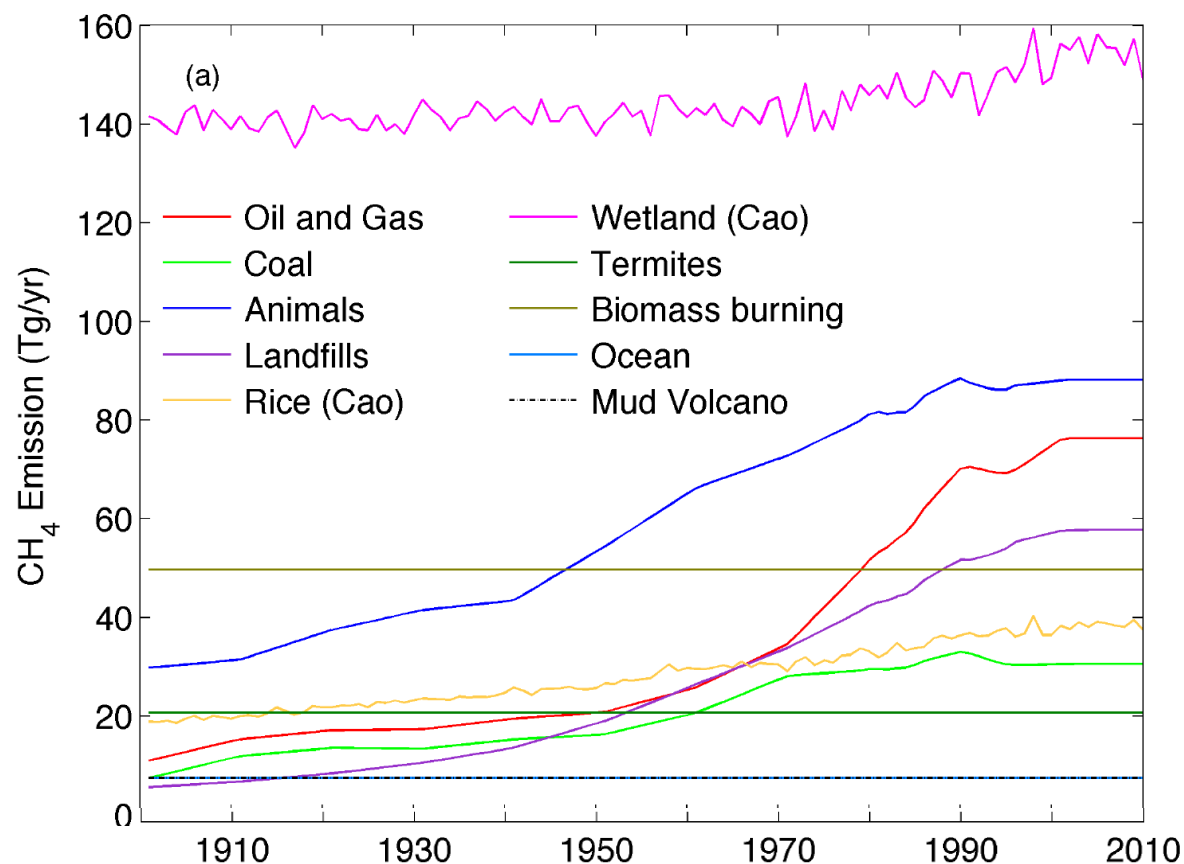
спутниковые данные о
насыщении почвы влагой:
12.6 ± 0.8 млн. км²



интервал между разными массивами данных: 4.3–13.4 млн. км²
воспроизведено по [Melton et al., 2013]

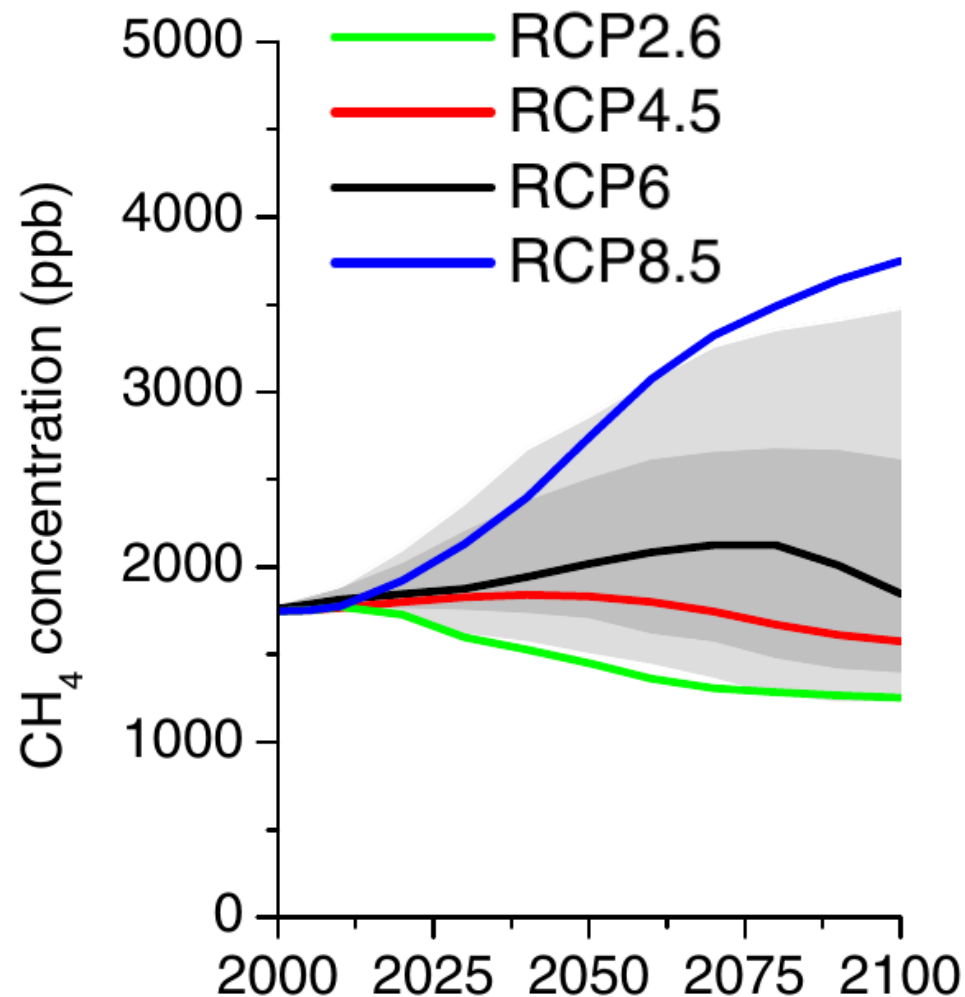
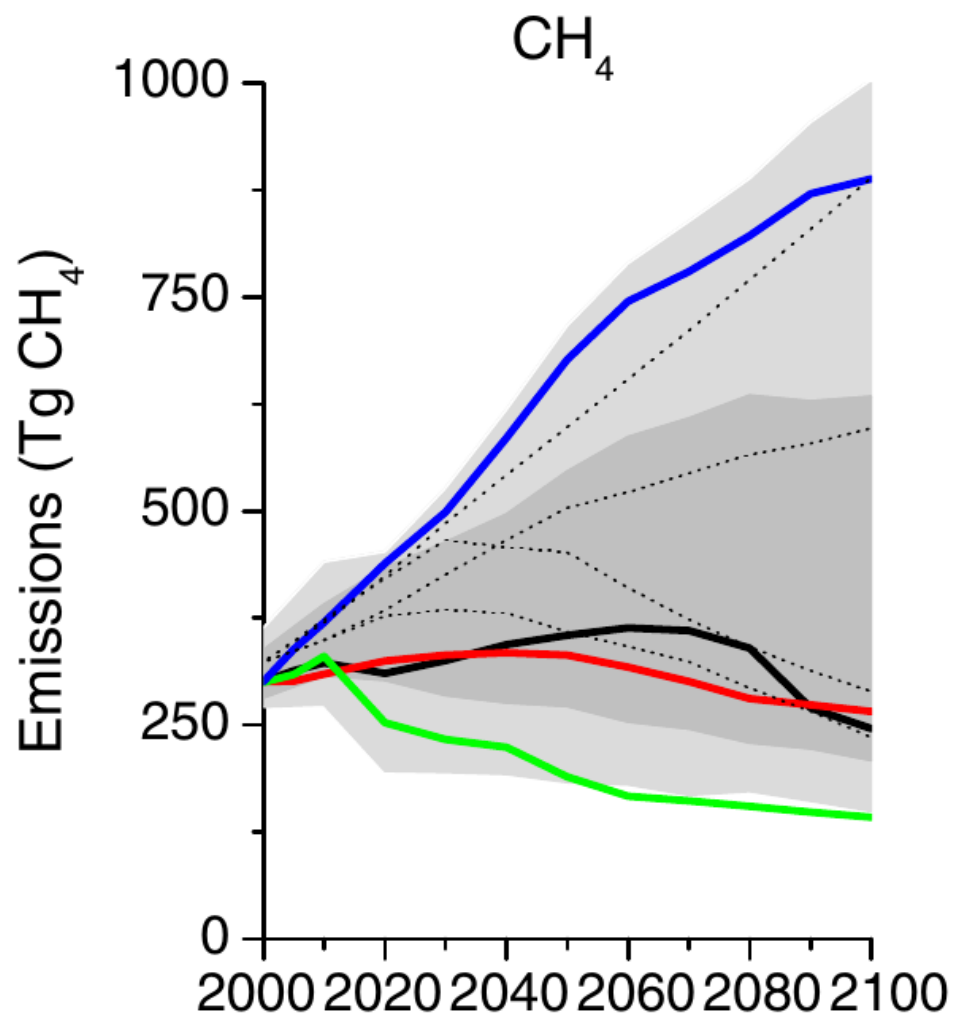
+ : мелиорация привела к уменьшению площади болот на 1/3 за
индустриальный период [Paudel et al., 2016]

Изменение интенсивности источников со временем [Ghosh et al., 2015]



- антропогенные эмиссии по данным EDGAR-3.2/HYDE-1.4
- эмиссии от болот, влажной почвы и рисовых полей по расчётам с моделью VISIT
- эмиссии от горения биомассы и термитов – данные GISS
- эмиссии из прибрежных регионов океана (Lambert and Schmidt, 1993)
- эмиссии от грязевых вулканов (Etiope and Milkov, 2004)

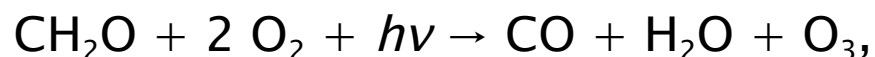
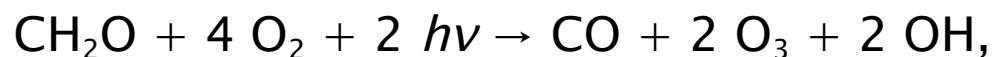
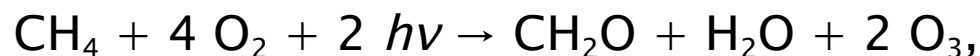
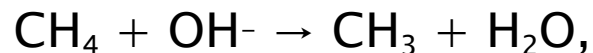
Сценарии изменения интенсивности антропогенных источников CH_4 в будущем [IPCC AR5]



Общие сведения о цикле метана: процессы в атмосфере

Разрушение CH₄ в атмосфере [Cicerone, Oremland, 1988]

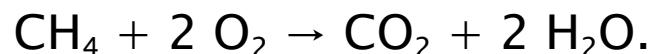
- Реакция с OH⁻ (90% от полной интенсивности):



- Взаимодействие с хлором:



- Взаимодействие с молекулярным кислородом:

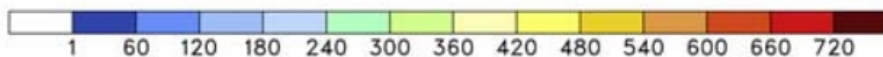
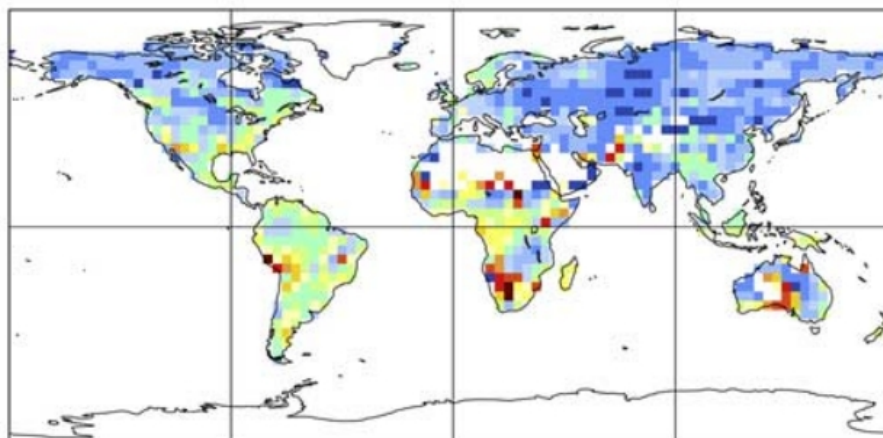


Поглощение CH_4 почвой [Curry, 2007]

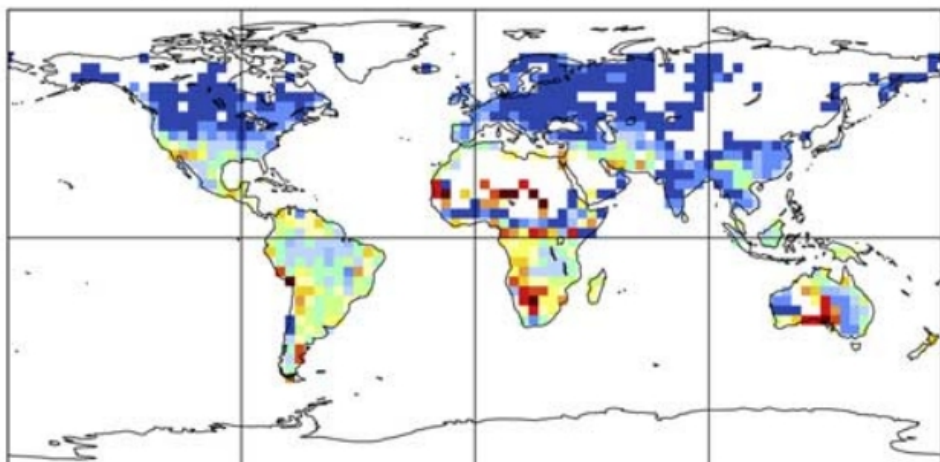
Модельные оценки.

Поглощение зависит от типа почвы, температуры и уровня грунтовых вод

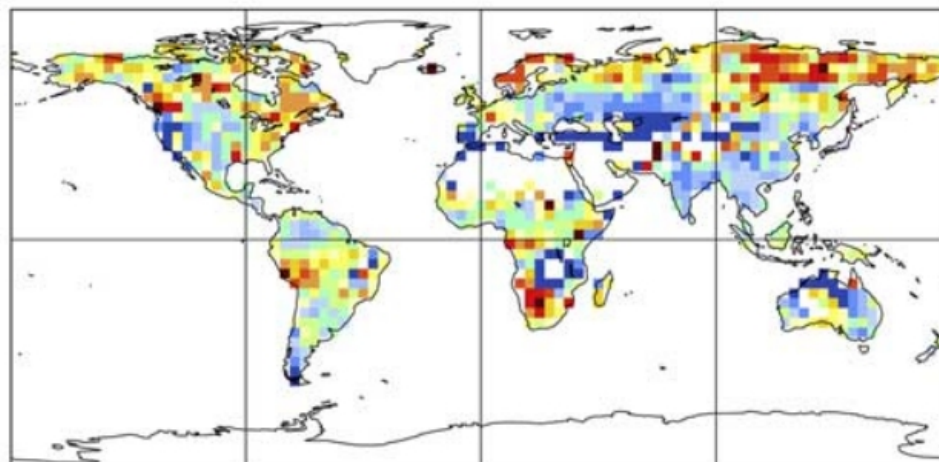
(a) Annual mean methane uptake. Total = 28.0 Tg/year



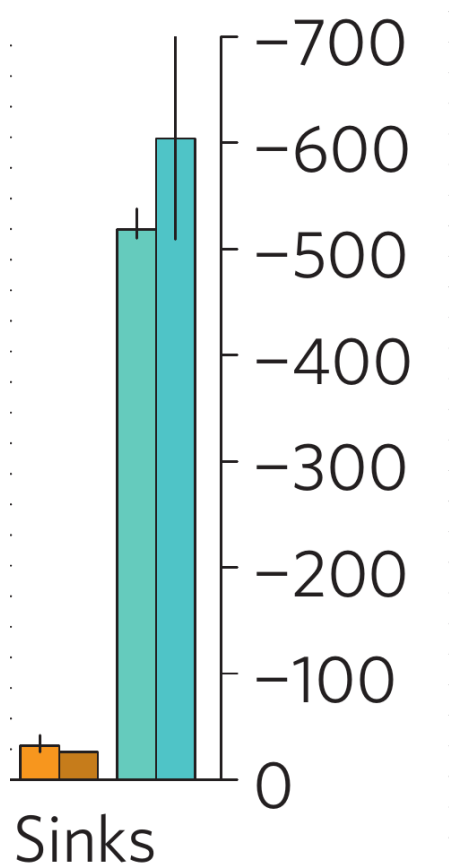
(b) January mean methane uptake. Total = 21.1 Tg/year



(c) July mean methane uptake. Total = 36.4 Tg/year



Интенсивность стоков CH_4 в атмосфере [Kirschke et al., 2013]



- Soil sink (T-D)
- Soil sink (B-U)
- Chemical loss (T-D)
- Chemical loss (B-U)

| | 2000-2009 | |
|---------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Sinks | Top-down | Bottom-up |
| Soils | 32 [26-42] ^{46,53,73,75,86} | 28 [9-47] ^{27,42,89} |
| Total chemical loss | 518 [510-538] ^{46,53,73,75,77} | 604 [483-738] ^{21,29,38,83} |
| Tropospheric OH | | 528 [454-617] ^{30,38} |
| Stratospheric loss | | 51 [16-84] ^{21,38,83} |
| Tropospheric Cl | | 25 [13-37] ²⁹ |

Растворимость метана в воде

Растворимость $2 \cdot 10^{-5}$ кг/кг

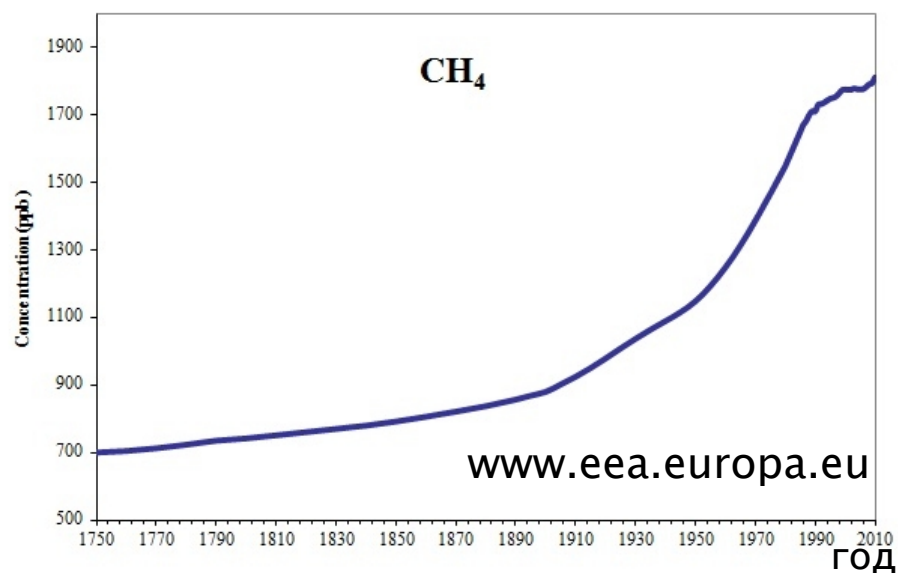
(\ll типичной растворимости CO_2 в воде, равной $1.4 \cdot 10^{-3}$ кг/кг)



Водные объекты (в том числе океан) практически не поглощают CH_4 из атмосферы.

Содержание метана в атмосфере: индустриальный период

| [Kirschke et al., 2013] | | |
|------------------------------|---------------|---------------|
| 2000-2009 | | |
| | Top-down | Bottom-up |
| TOTALS | | |
| Sum of sources | 548 [526-569] | 678 [542-852] |
| Sum of sinks | 540 [514-560] | 632 [592-785] |
| Imbalance (sources-sinks) | 8 [-4-19] | |
| Atmospheric growth rate | 6 | |



IPCC AR5:

доиндустриальная масса: ~2 тыс. ТгCH₄

изменение за индустриальный период:

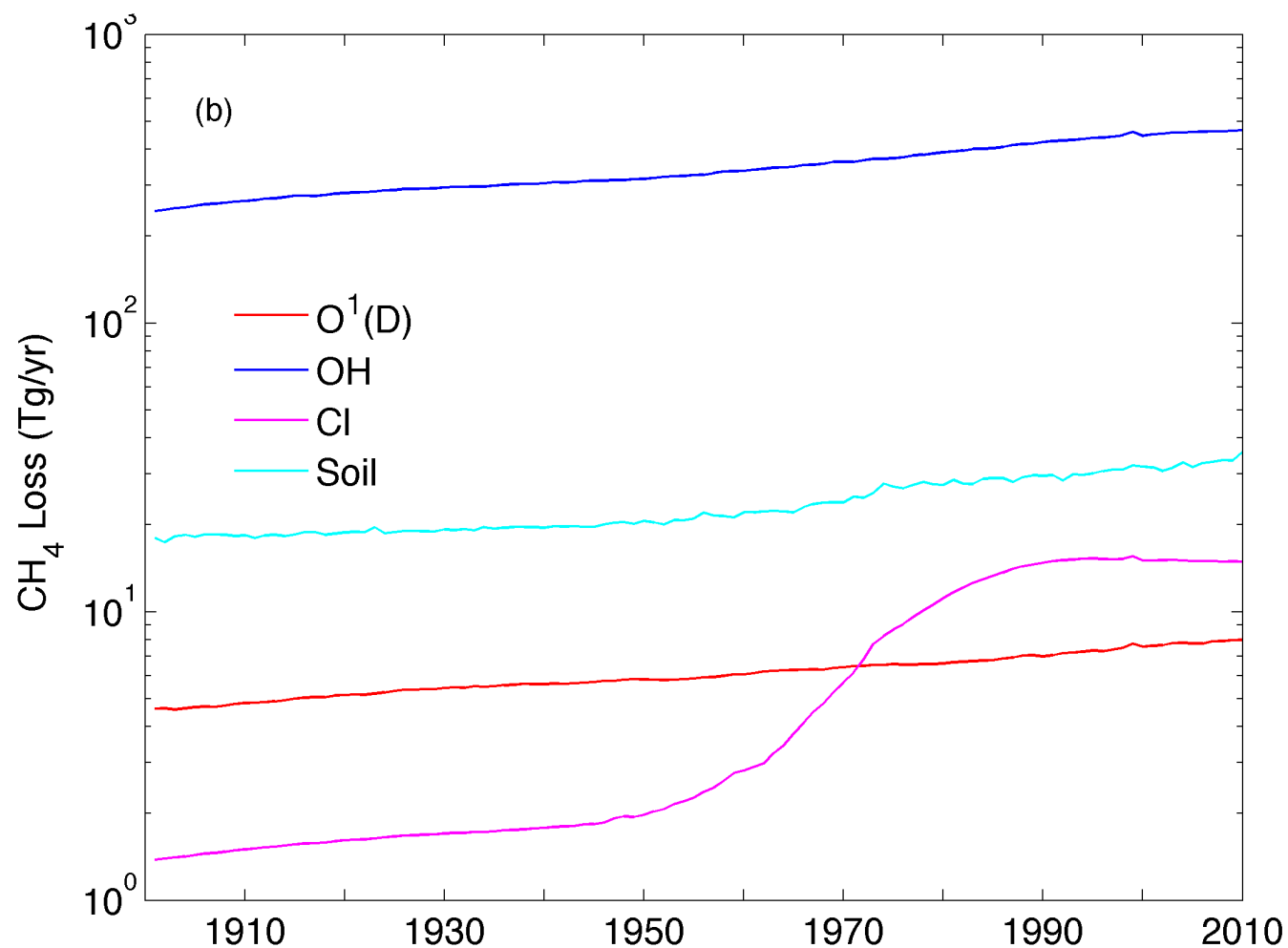
~3 тыс. ТгCH₄

Изменение интенсивности стоков CH_4 со временем [Ghosh et al., 2015]

TD-оценки

модель химии атмосферы JAMSTEC's ACTM

метеорологические условия заданы по данным реанализа JRA-25



Время жизни CH_4 в атмосфере

Масса CH_4 в атмосфере

$$d M_{\text{CH}_4, \text{a}} / dt = E_{\text{a}} + E_{\text{n}} - S_{\text{CH}_4, \text{a}} = E_{\text{a}} + E_{\text{n}} - M_{\text{CH}_4} / \tau_{\text{CH}_4}$$

(E_{a} – внешние эмиссии CH_4 , E_{n} – естественные источники CH_4)

Время жизни:

$$\tau_{\text{CH}_4} = M_{\text{CH}_4, \text{a}} / S_{\text{CH}_4, \text{a}}$$

BU-оценки: 6.3–8.4 г.

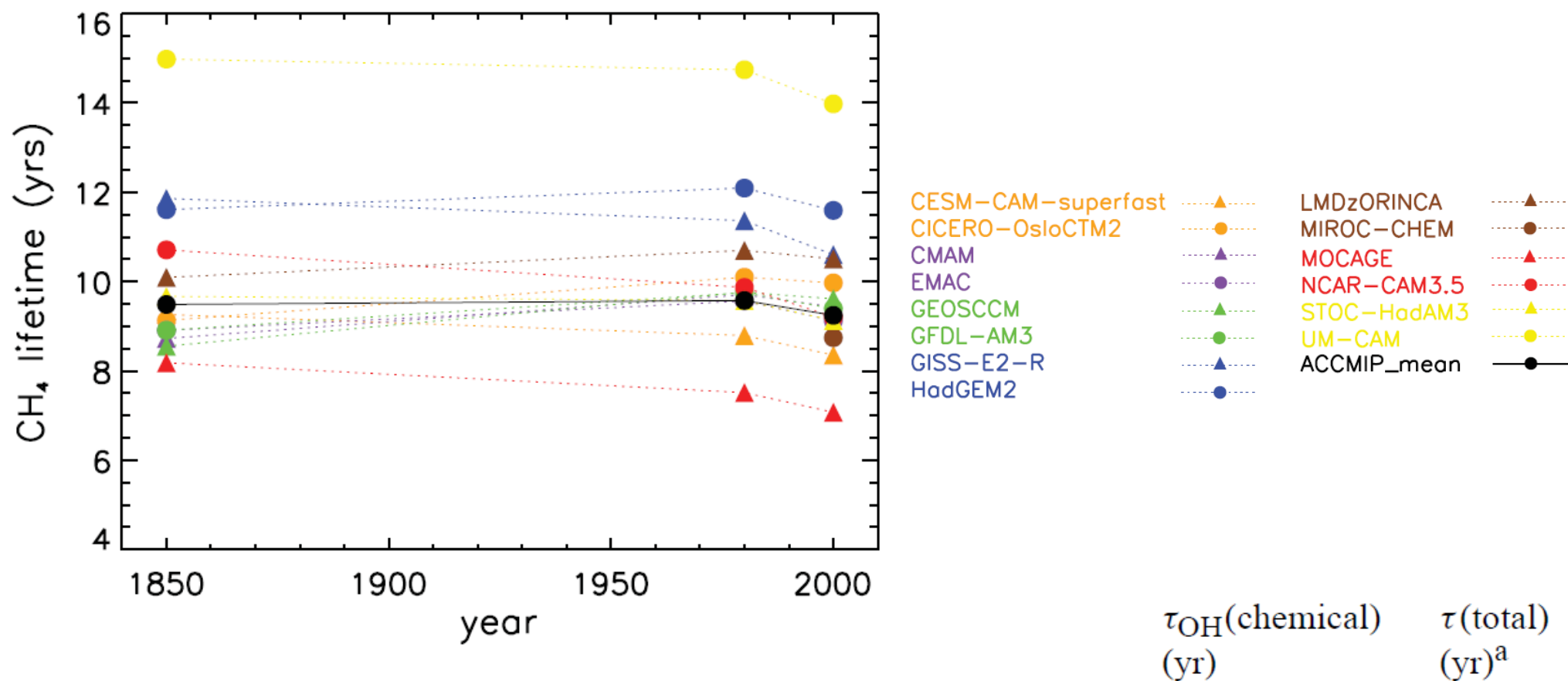
TD-оценки: 8.8–9.7 г.



CH_4 – "почти" хорошо перемешанный газ

$$\tau_{\text{CH}_4} \sim (q_{\text{CH}_4})^{0.238} [\text{Osborn, Wigley, 1994}]$$

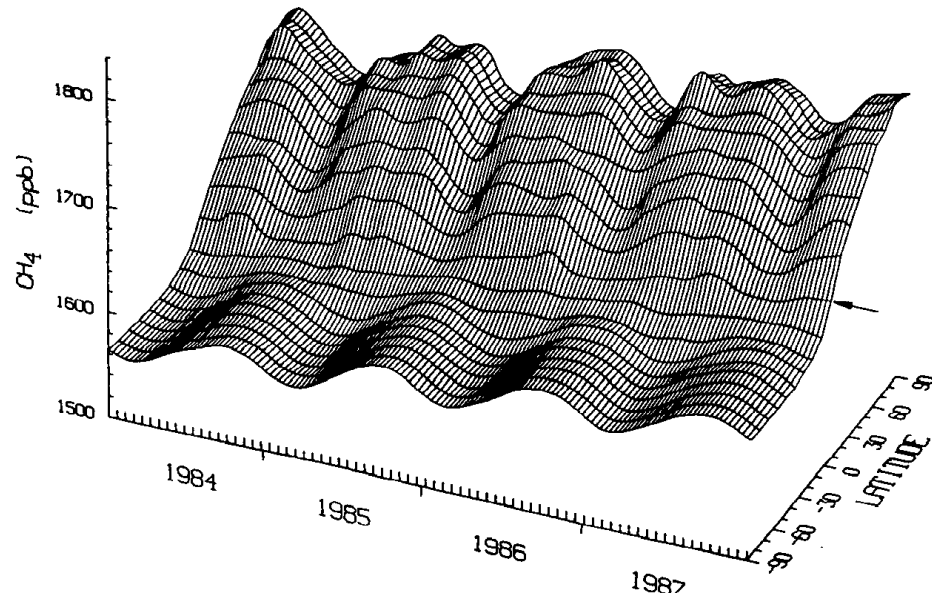
Время жизни CH_4 в атмосфере: проект сравнения моделей химии атмосферы ACCMIP [Voulgarakis et al., 2013]



| | $\tau_{\text{OH}}(\text{chemical})$ (yr) | $\tau(\text{total})$ (yr) ^a |
|------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Mean \pm stand. dev. | 9.8 ± 1.6 | 8.6 ± 1.2 |
| Mean \pm stand. dev. (with trop1 | 9.7 ± 1.6 | — |
| Mean \pm stand. dev. (with trop2 | 9.8 ± 1.6 | — |
| Mean \pm stand. dev. (selected n | 9.3 ± 0.9 | 8.2 ± 0.8 |

Годовой ход и межширотный градиент q_{CH_4}

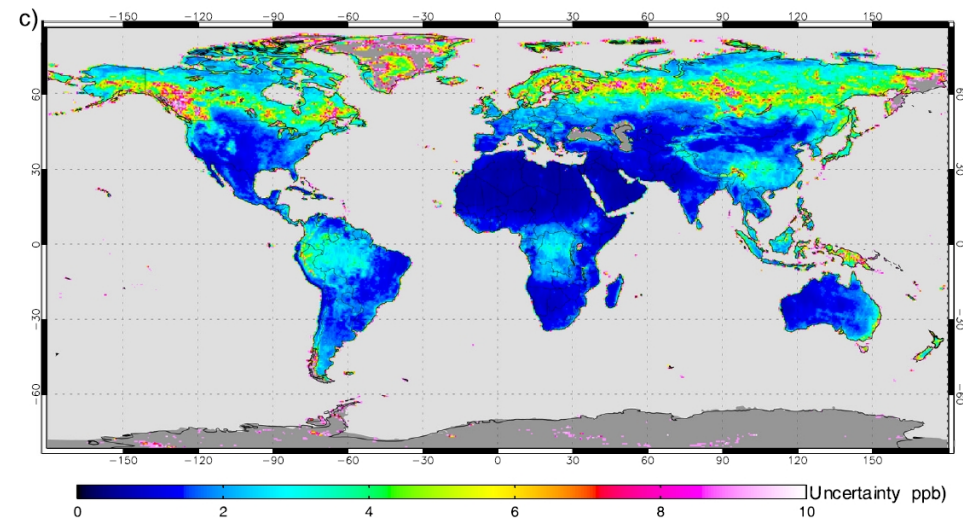
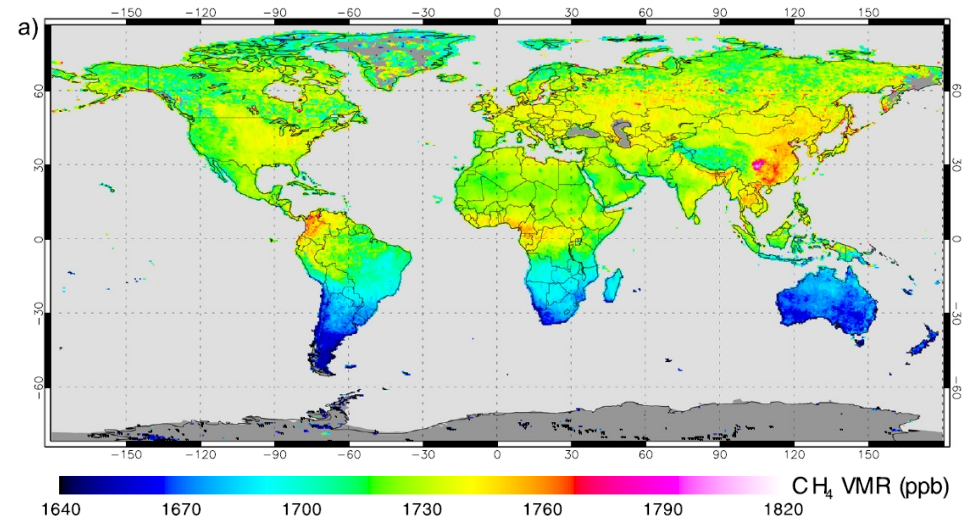
данные NOAA/CMDL [Fung et al., 1991]



Годовой ход q_{CH_4} :

- суша средних и субполярных широт Северного полушария: 30–40 млрд⁻¹
- Южное полушарие: 10–20 млрд⁻¹, в средних широтах почти не зависит от широты.
- В обоих полушариях, несмотря на интенсификацию основных источников летом, q_{CH_4} минимальна именно летом и осенью из-за соответствующей интенсификации химического разрушения CH_4 в атмосфере.

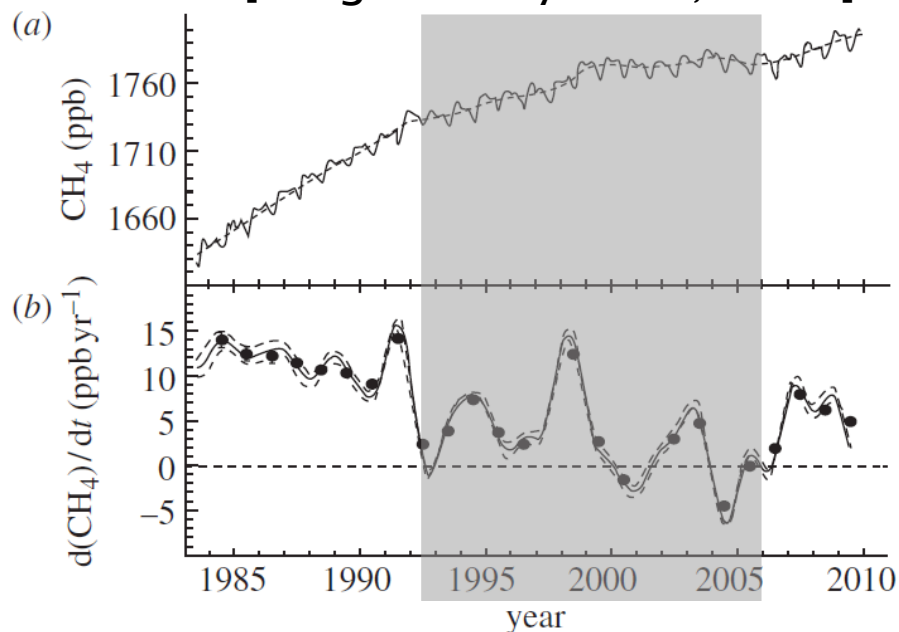
данные SCIAMACHY, 2003–2004 гг.
[Frankenberg et al., 2006]



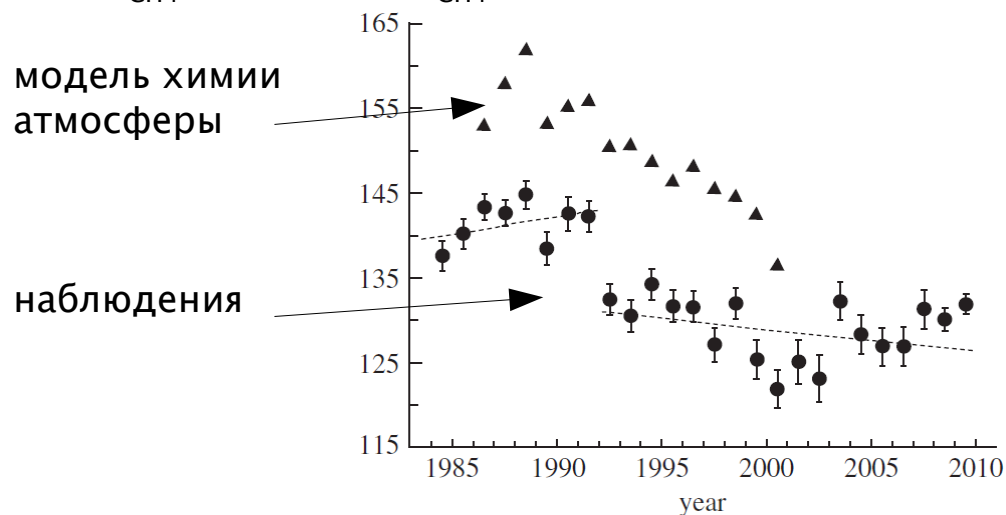
$q_{\text{CH}_4}(\text{СП}) - q_{\text{CH}_4}(\text{ЮП}) = 80\text{--}100 \text{ млрд}^{-1}$
[Wahlen, 1993]

Период стабильного q_{CH_4} конца 1990-х – начала 2000-х гг.

[Dlugokencky et al., 2011]

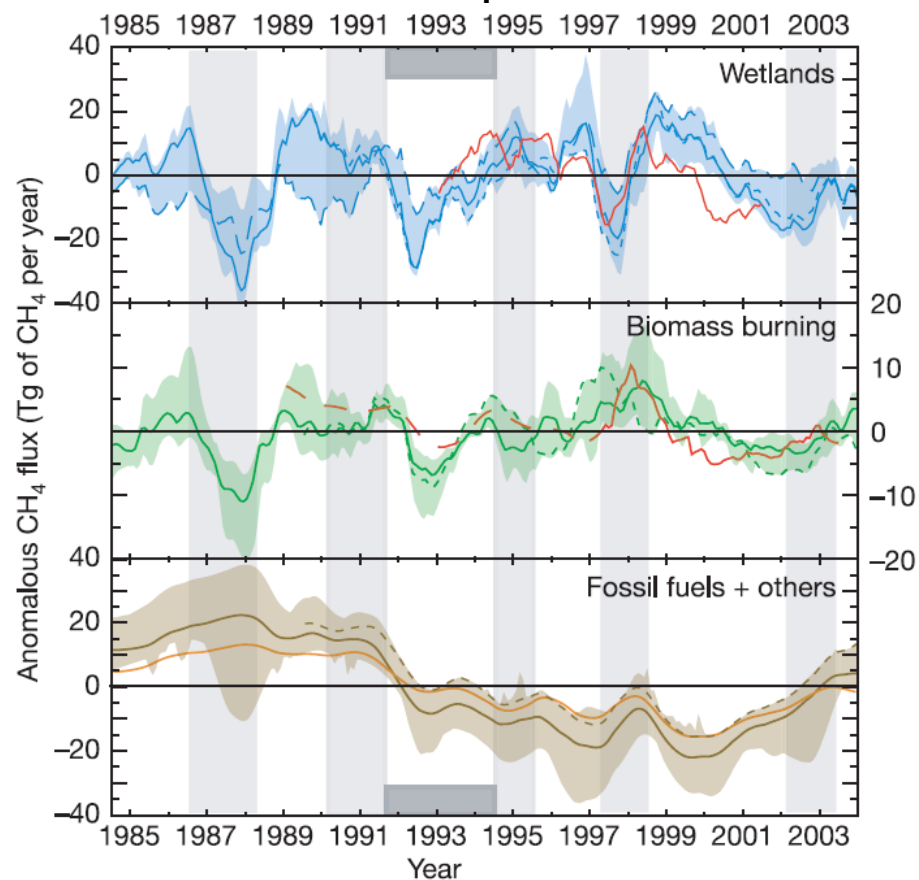


$q_{\text{CH}_4}(53-90^\circ\text{N}) - q_{\text{CH}_4}(53-90^\circ\text{S})$ [млрд⁻¹]



[Bousquet et al., 2006]

TD-оценки

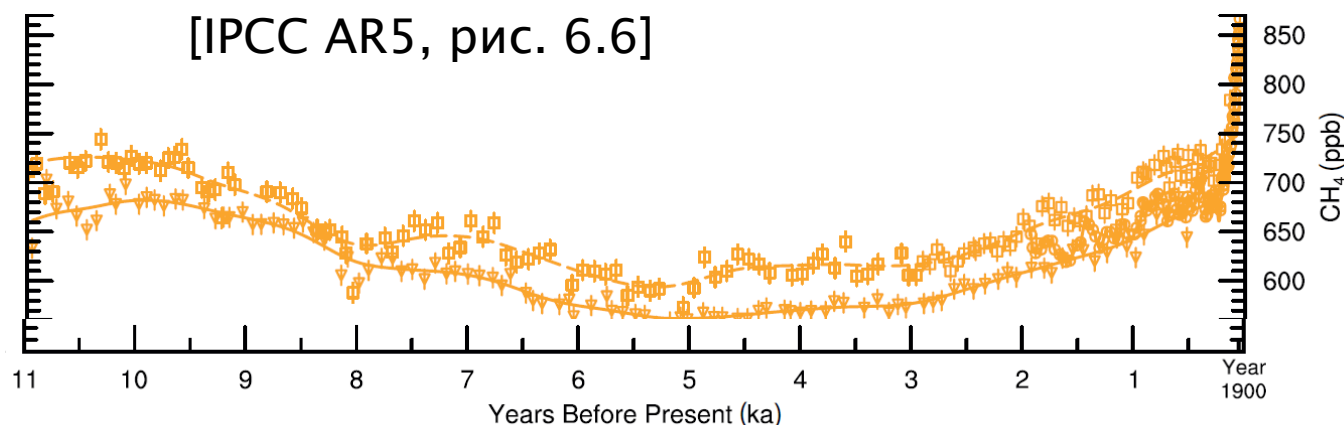


уменьшение антропогенных эмиссий метана в атмосферу в 1990-х гг. и ослабление выделения метана болотами и влажной почвой в 2000-х гг.

Изменение q_{CH_4} по данным ледового бурения:

голоцен

[IPCC AR5, рис. 6.6]



разность q_{CH_4} между Гренландией и Антарктидой
[Chappellaz et al., 1997]:

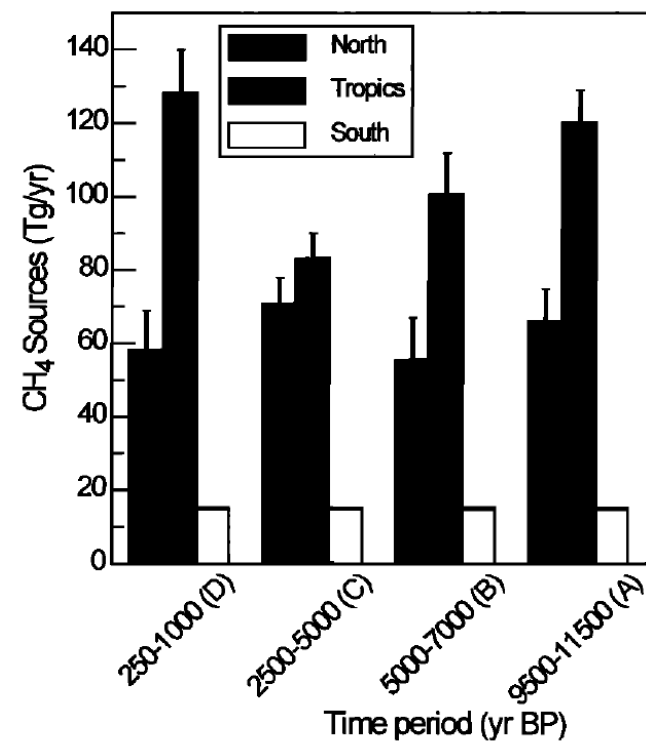
11.5–0.25 тыс. л.н.: 44 ± 7 млрд⁻¹

(A) 11.5–9.5 тыс. л.н.: 44 ± 4 млрд⁻¹

(B) 7–5 тыс. л.н.: 33 ± 7 млрд⁻¹

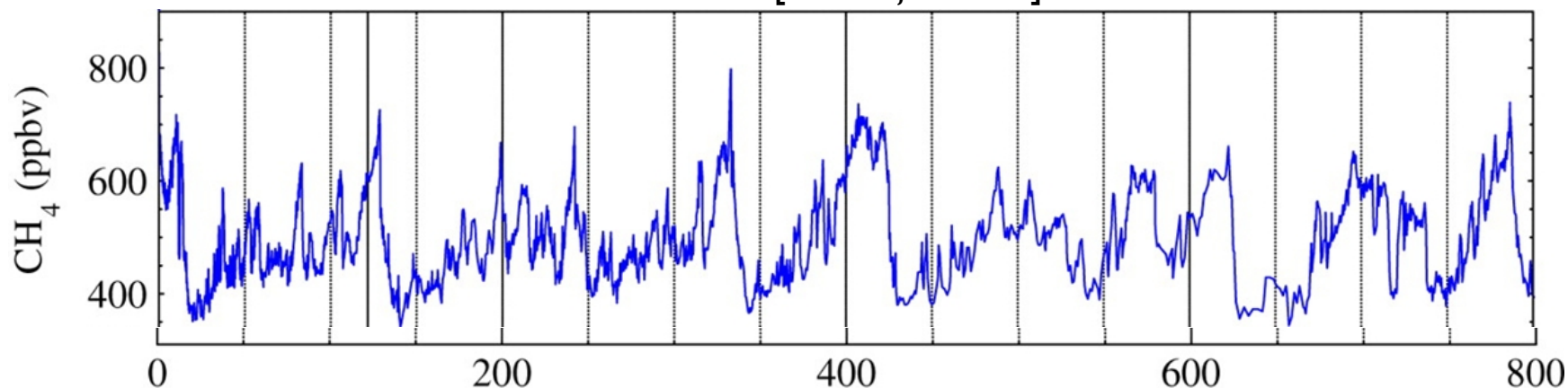
(C) 5–2.5 тыс. л.н.: 50 ± 3 млрд⁻¹

(D) 1–0.25 тыс. л.н.: 35 ± 7 млрд⁻¹

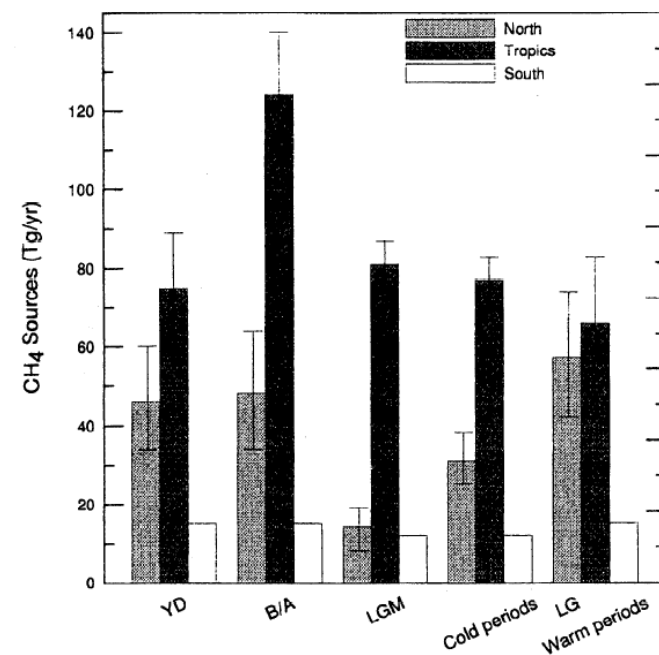
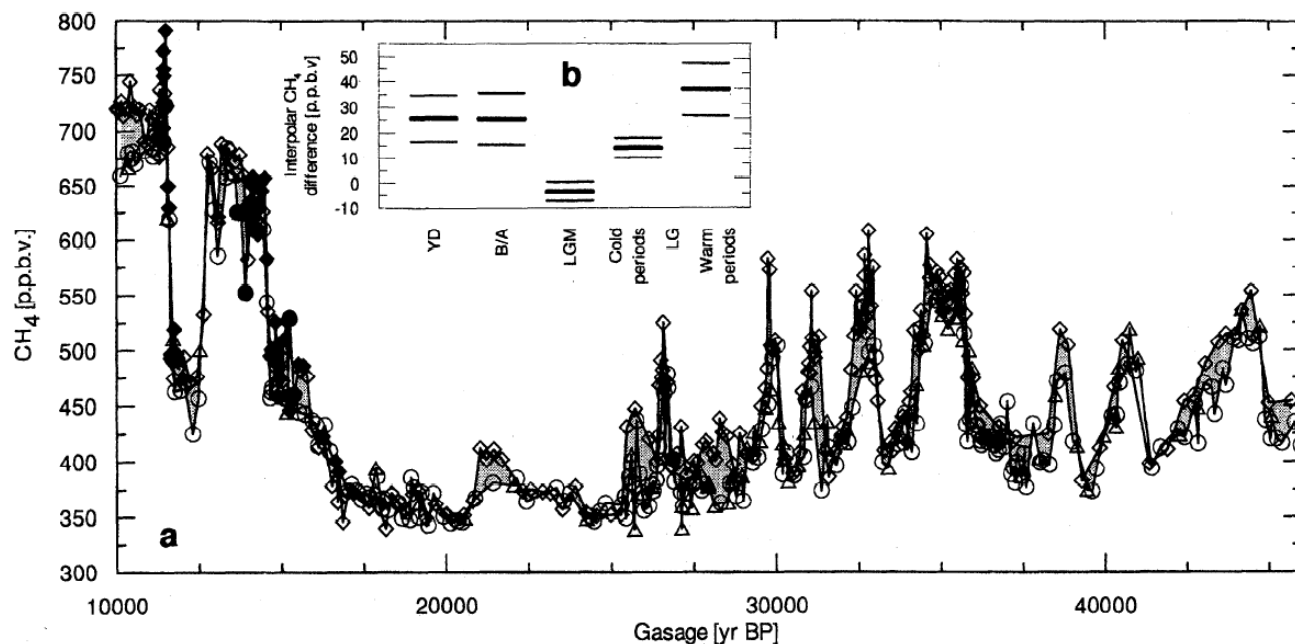


Изменение q_{CH_4} по данным ледового бурения: ледниковые циклы

EPICA [Wolff, 2011]



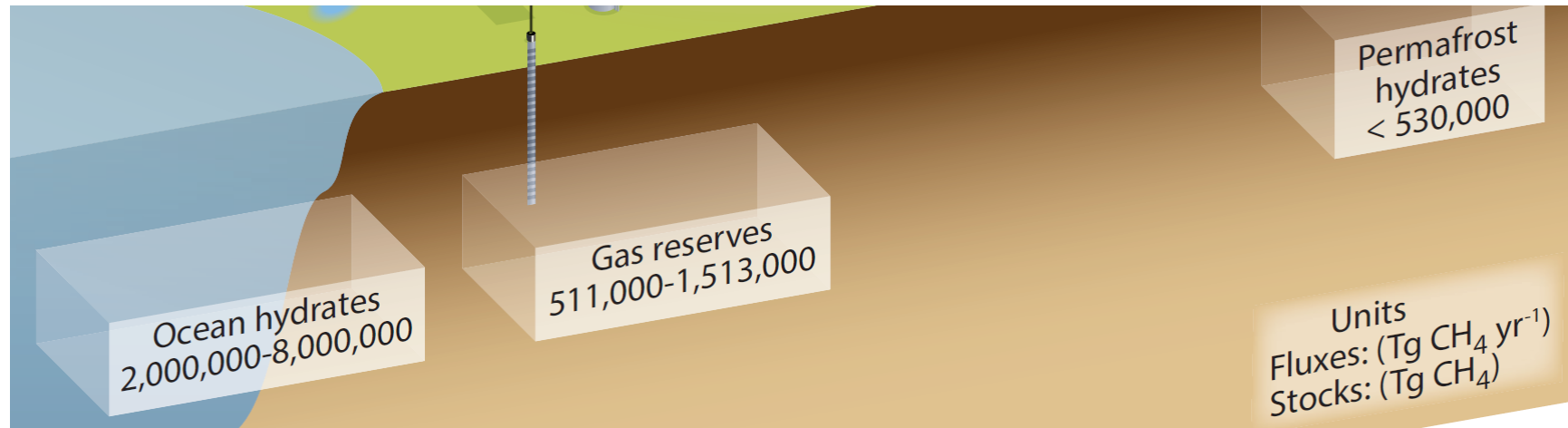
[Dällenbach et al., 2000]



Общие сведения о цикле метана: другие резервуары

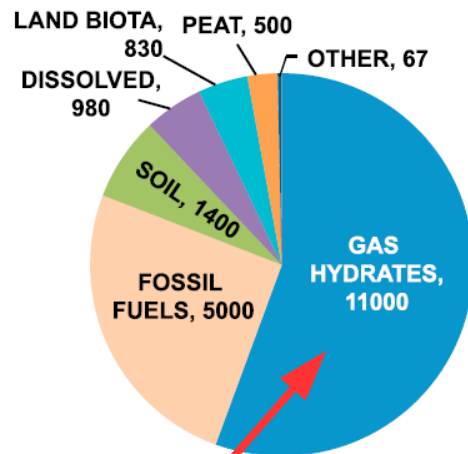
Другие резервуары метана

[IPCC AR5]



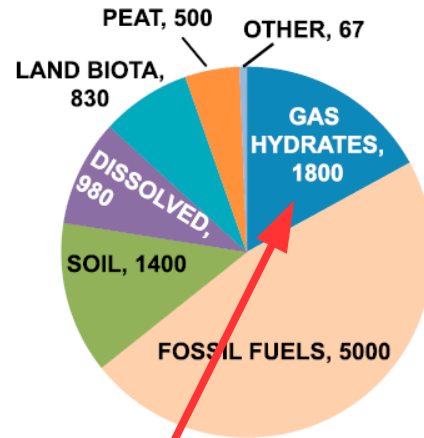
[Ruppel, Kessler, 2017]

A.



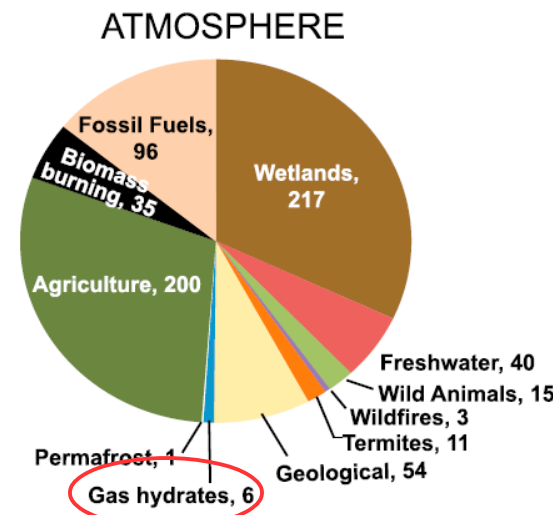
[Kvenvolden, 1988]

B.

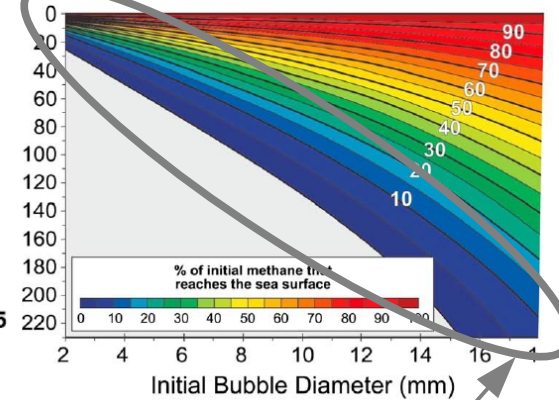


[Milkov, 2004]

C.



[McGinnis et al., 2006]



ТИПИЧНО

Общие сведения о цикле метана: чувствительность к изменениям климата

Эмиссии от болот и влажной почвы: чувствительность к климату

- уменьшаются при уменьшении увлажнения климата
 - изменение площади почвы, насыщенной влагой (в том числе болот)
 - изменение уровня грунтовых вод
- производство CH_4 интенсифицируется при увеличении температуры (часто относят и к эмиссиям)

$$E_w \sim Q_{10}^{\Delta T/10 \text{ C}}$$

Q_{10} по результатам прямых измерений:

[Khalil et al., 1998]: 1.5–3

[Walter and Heimann, 2000]: 2–6

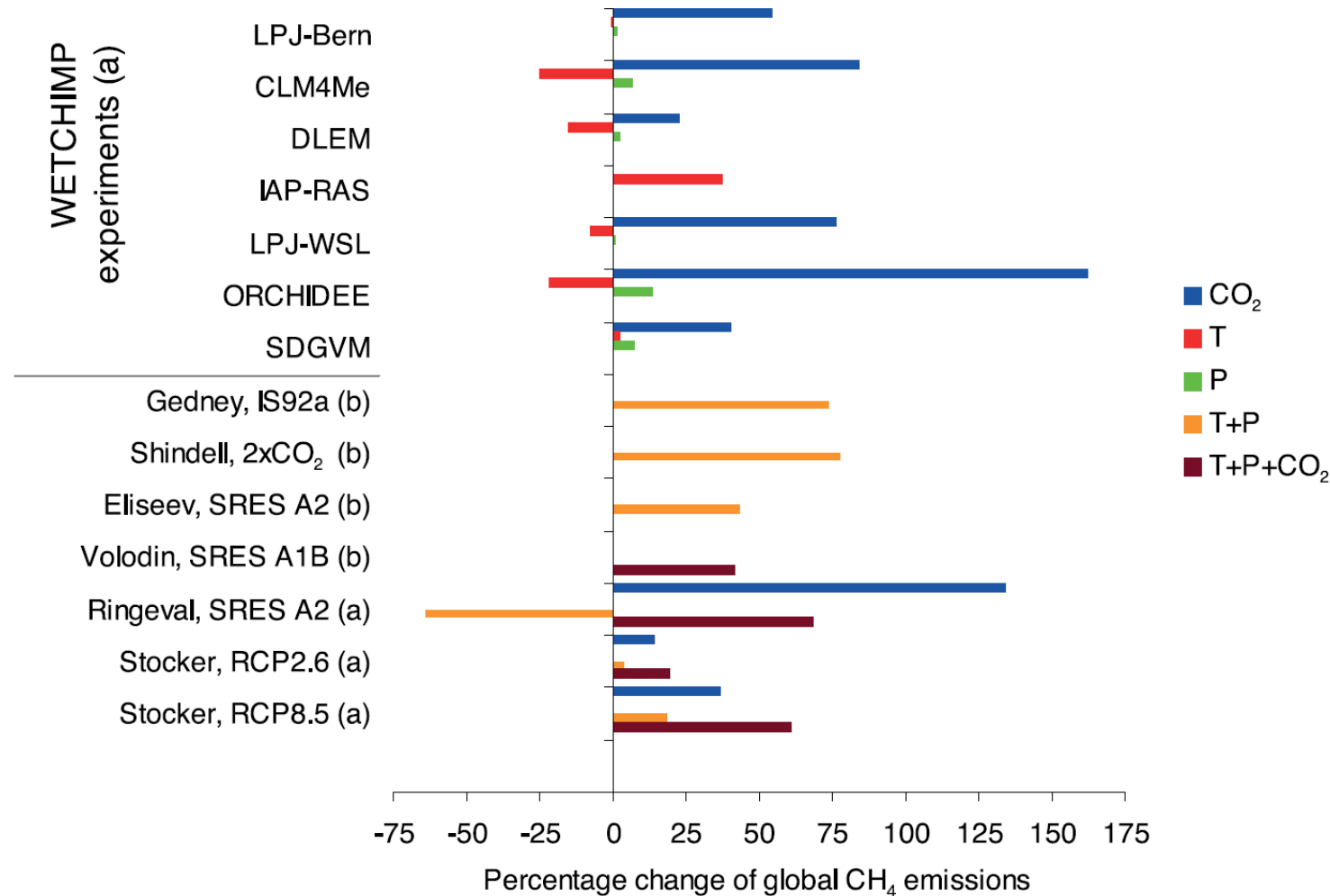
[Christensen et al., 2003]: 5

[Worthy et al., 2000]: 4 (годовой ход)

7 (межгодовые изменения)

Частично разброс связан с трудностью выделения влияния различных факторов

Эмиссии от болот и влажной почвы: чувствительность к климату в моделях [IPCC AR5, рис. 6.37]



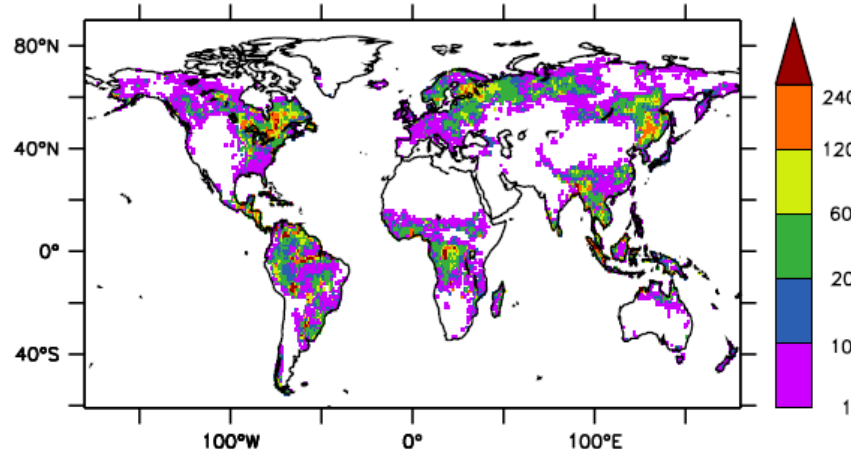
К 2100 г. при сценарии IS92a/SRES A2/RCP 8.5 возможно увеличение E_w в 1.5–2 раза [Gedney et al., 2004; Елисеев и др., 2008; Stocker et al., 2013]

Эмиссии от болот и влажной почвы: влияние различных процессов, модель ORCHIDEE-WET [Ringeval et al., 2011]

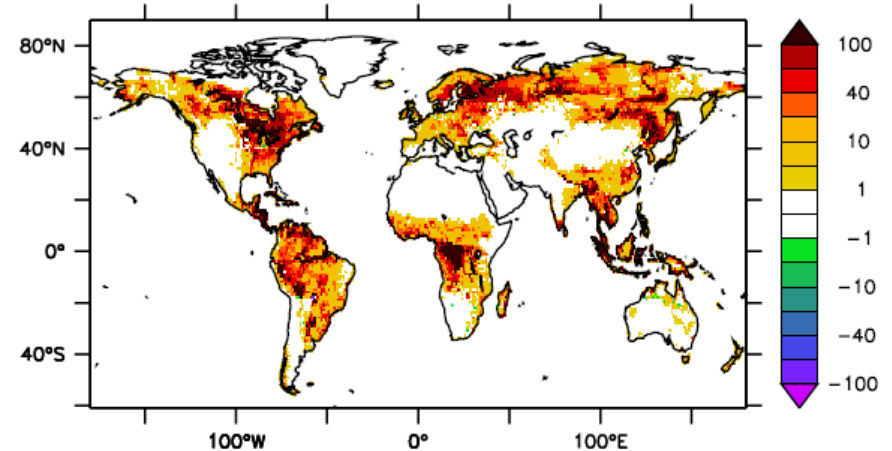
q_{CO_2} – сценарий SRES A2

климат – численный эксперимент с IPSL-CM4 при сценарии SRES A2

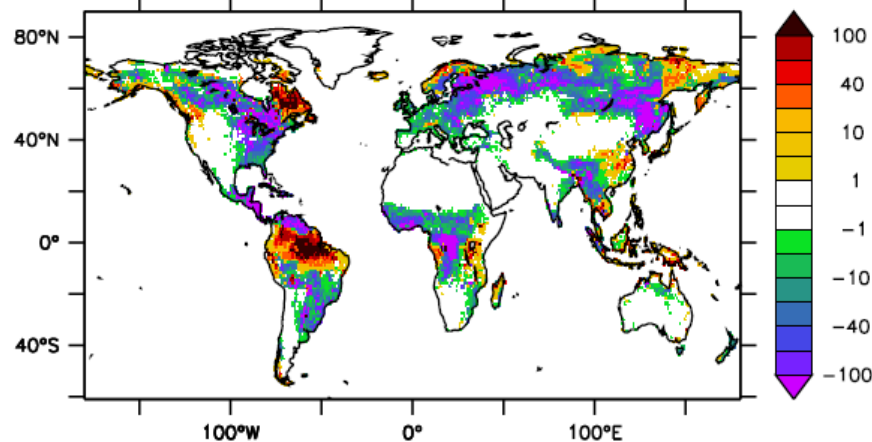
a) CTRL CH_4 emissions for 2090–2099 (10^{-3} Tg/yr)



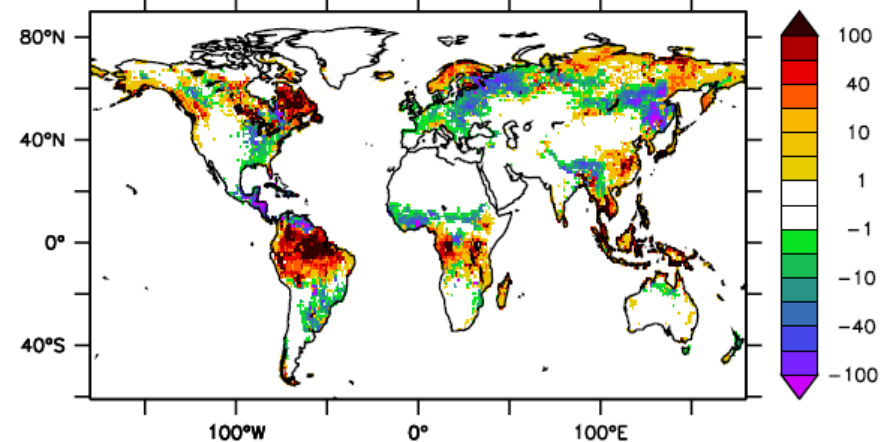
b) Additional emissions due to CO_2



c) Additional emissions due to climate

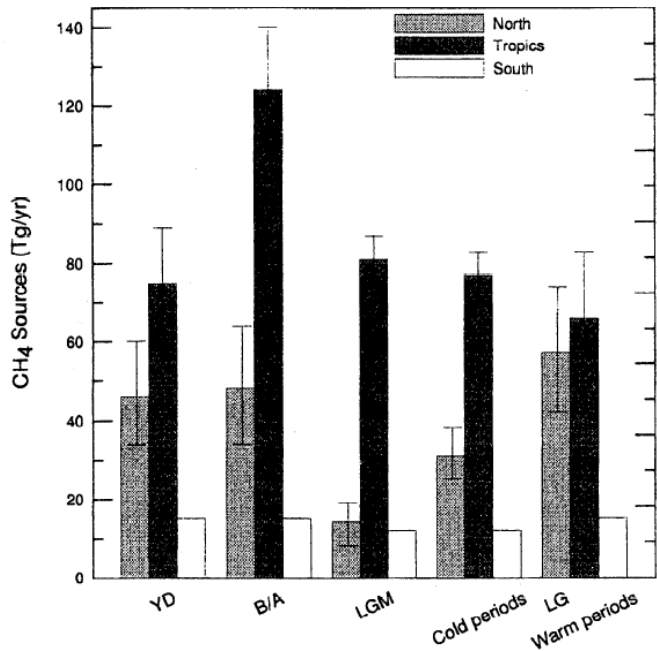


d) Additional emissions due to climate & CO_2



Эмиссии от болот и влажной почвы: последний ледниковый максимум

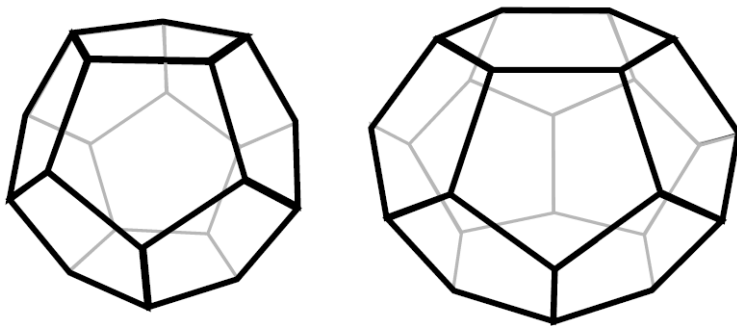
| | современный | PI | LGM |
|--------------------------------|-------------|-----|-----|
| [Dällenbach et al., 2000] (TD) | | | 106 |
| [Brook et al., 2000] (TD) | | 159 | 111 |
| [Kaplan, 2002] (TD) | 140 | | 107 |



[Dällenbach et al., 2000]

Эмиссии от гидратов метана: чувствительность к климату (1)

Кристаллическая решётка
гидратов метана [Buffett, 2000]



Теряют устойчивость при

- высокой температуре
- низком давлении

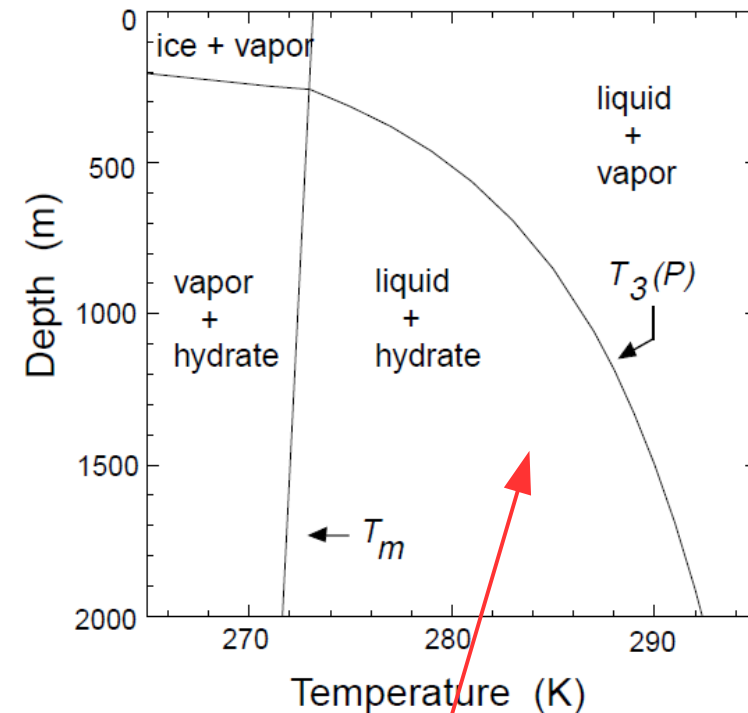
т.е.

- при потеплении климата
- при уменьшении уровня океана



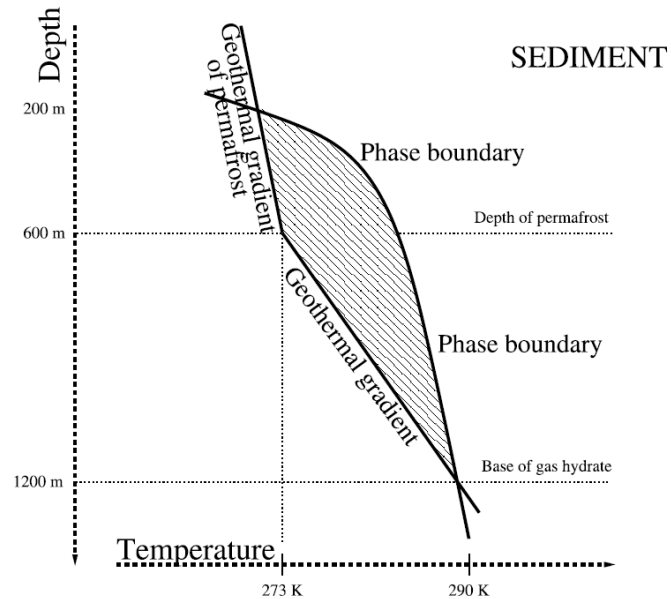
предположение о "метановой бомбе"

[Buffett, 2000]

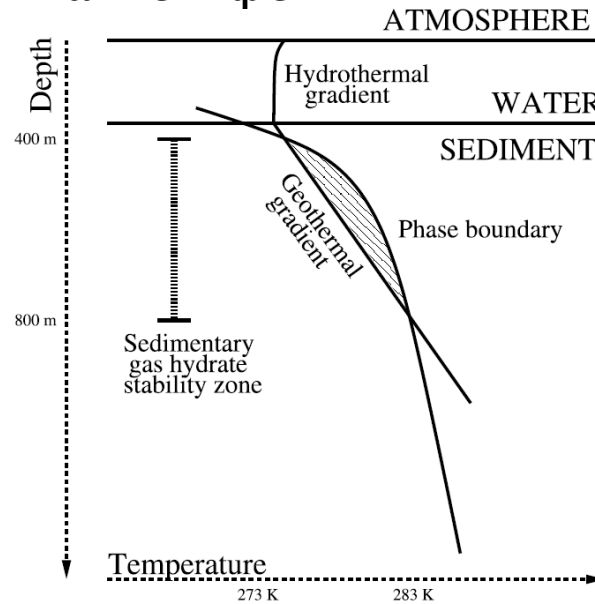


Эмиссии от гидратов метана: чувствительность к климату (2)

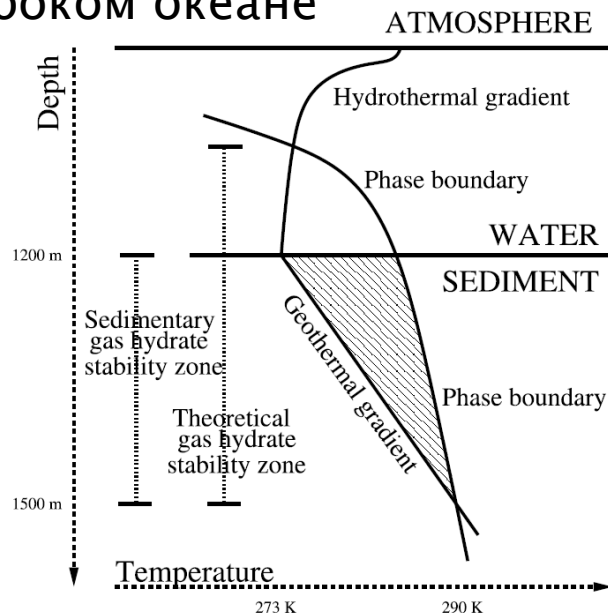
в вечной мерзлоте



на шельфе



в глубоком океане

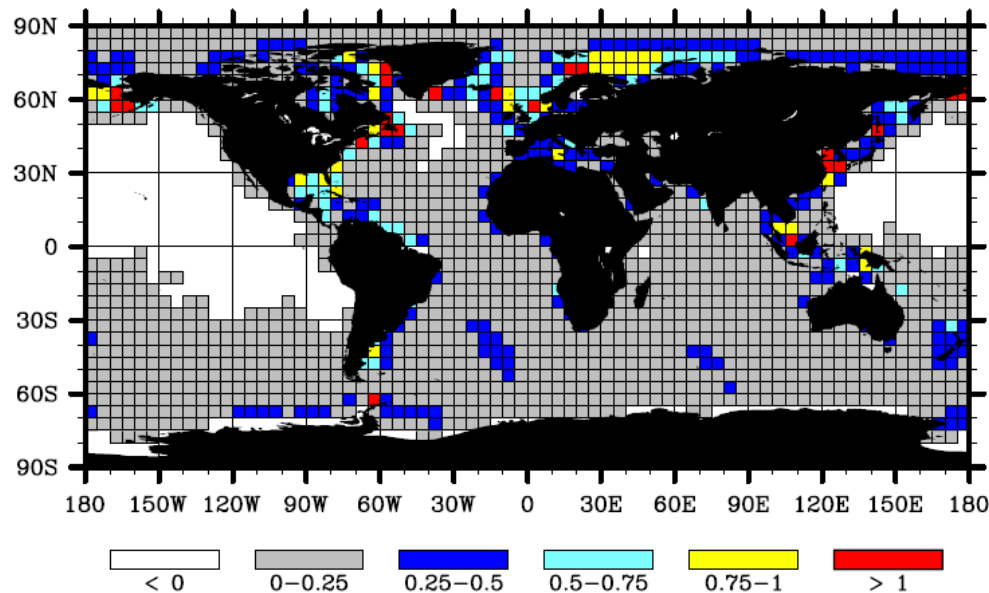


[O'Connor et al., 2010]

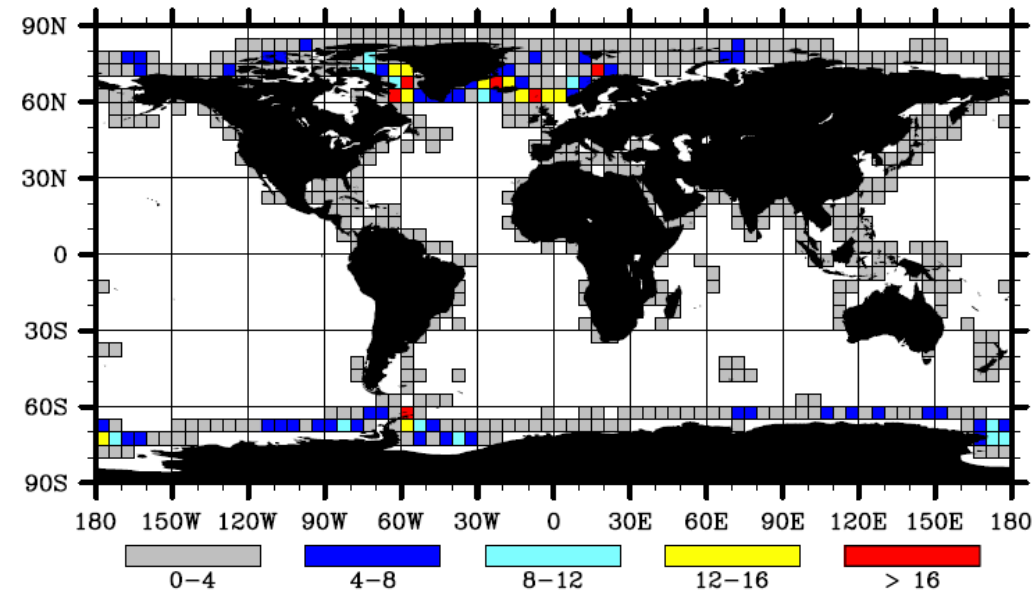
Выделение метана при диссоциации субаквальных гидратов метана на вековом масштабе (1) [Lamarque, 2008]

(изменение придонной температуры по ансамблю CMIP3 в расчётах с увеличением q_{CO_2} на 1%/год) + (экстраполяция равновесного отклика ЗСГМ на изменение придонной температуры по модели TOUGH+HYDRATE)

изменение придонной температуры [°C]



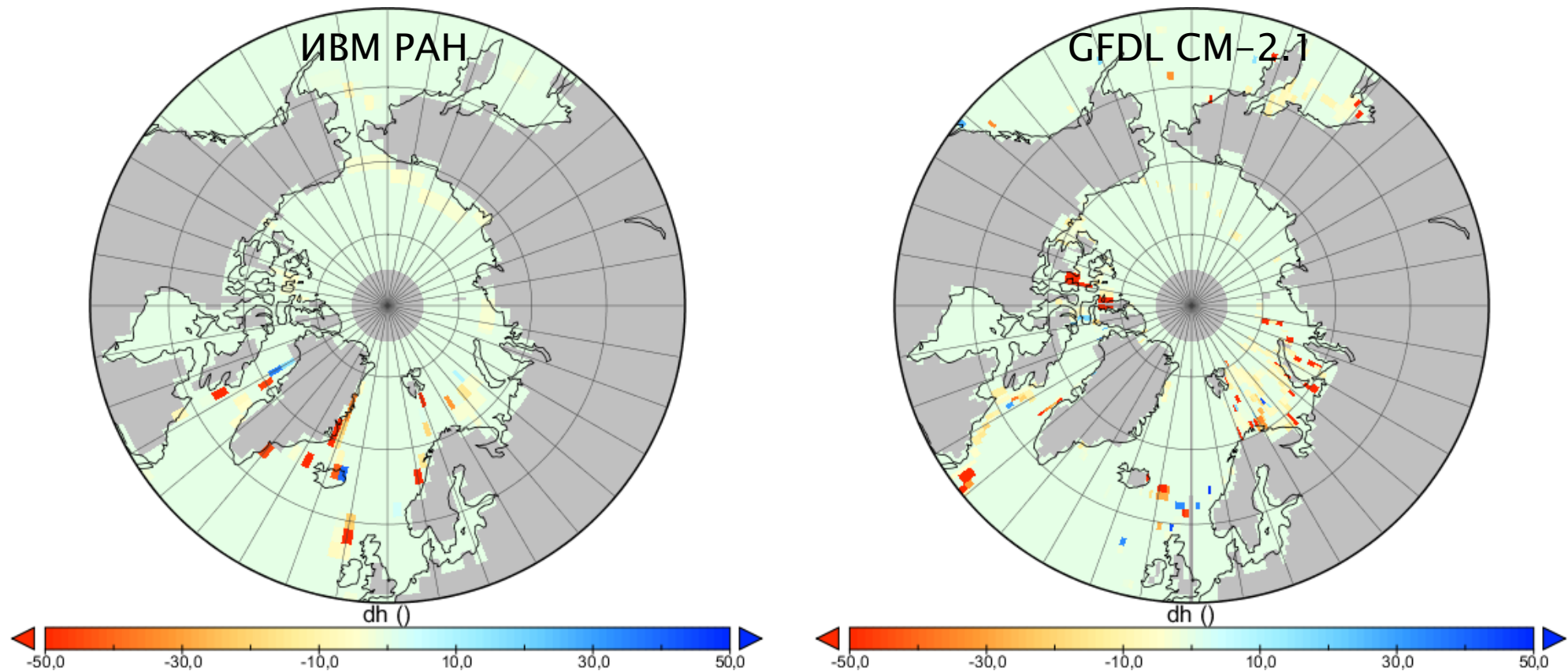
выделение CH_4 в воду в ячейке $5^\circ \cdot 5^\circ$ [$\text{TgCH}_4/\text{год}$]



не учитывались метангидраты в вечной мерзлоте шельфа

Изменение толщины ЗСГМ [м] при диссоциации субаквальных гидратов метана на вековом масштабе (1) [Денисов и др., 2011]

(изменение придонной температуры по моделям CMIP3 при сценарии SRES A2) +
(модель термического состояния донных отложений ИФА РАН) +
учёт реликтовой вечной мерзлоты шельфа



$\approx 500 \text{ МтCH}_4/\text{год}$

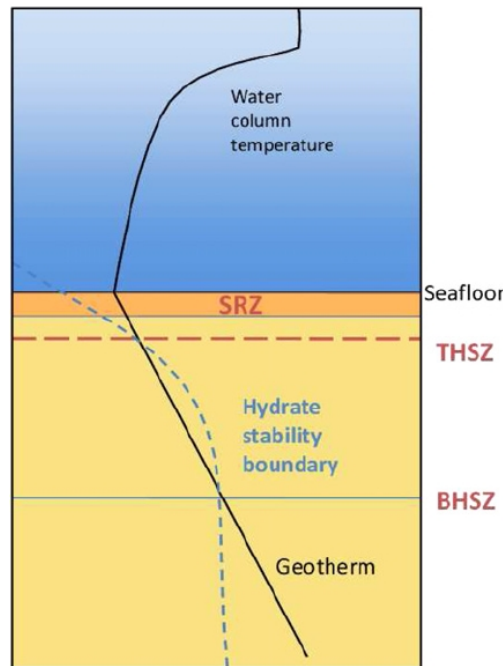
\Rightarrow близко к суммарной интенсивности всех современных CH_4

(но не учитывается растворение метана в воде и окисление в ней)

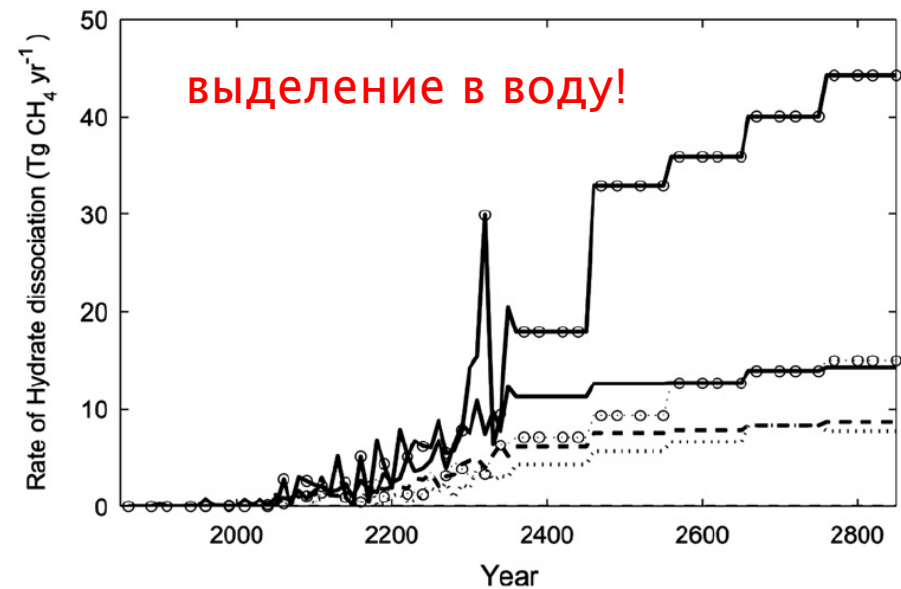
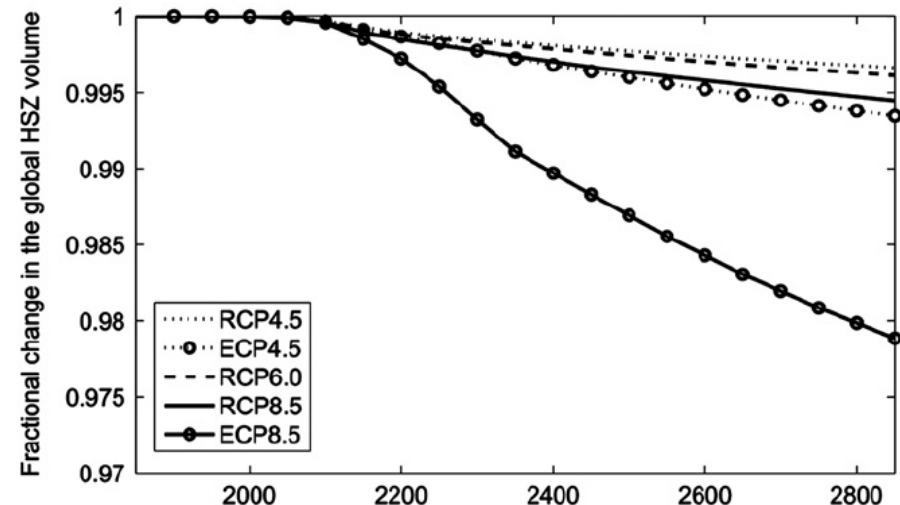
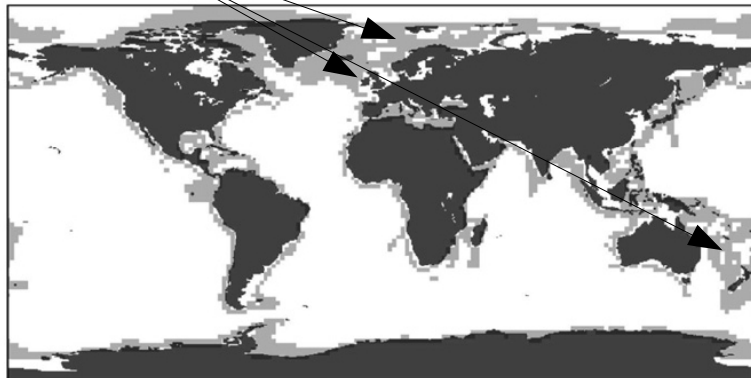
Выделение метана при диссоциации субаквальных гидратов метана на тысячелетнем масштабе [Hunter et al., 2013]

(изменение придонной температуры по ансамблю CMIP5) +
(модель термического состояния донных отложений без учёта фазовых переходов)
+ (соотношения для ЗСГМ)

не учитывались метангидраты в вечной мерзлоте шельфа

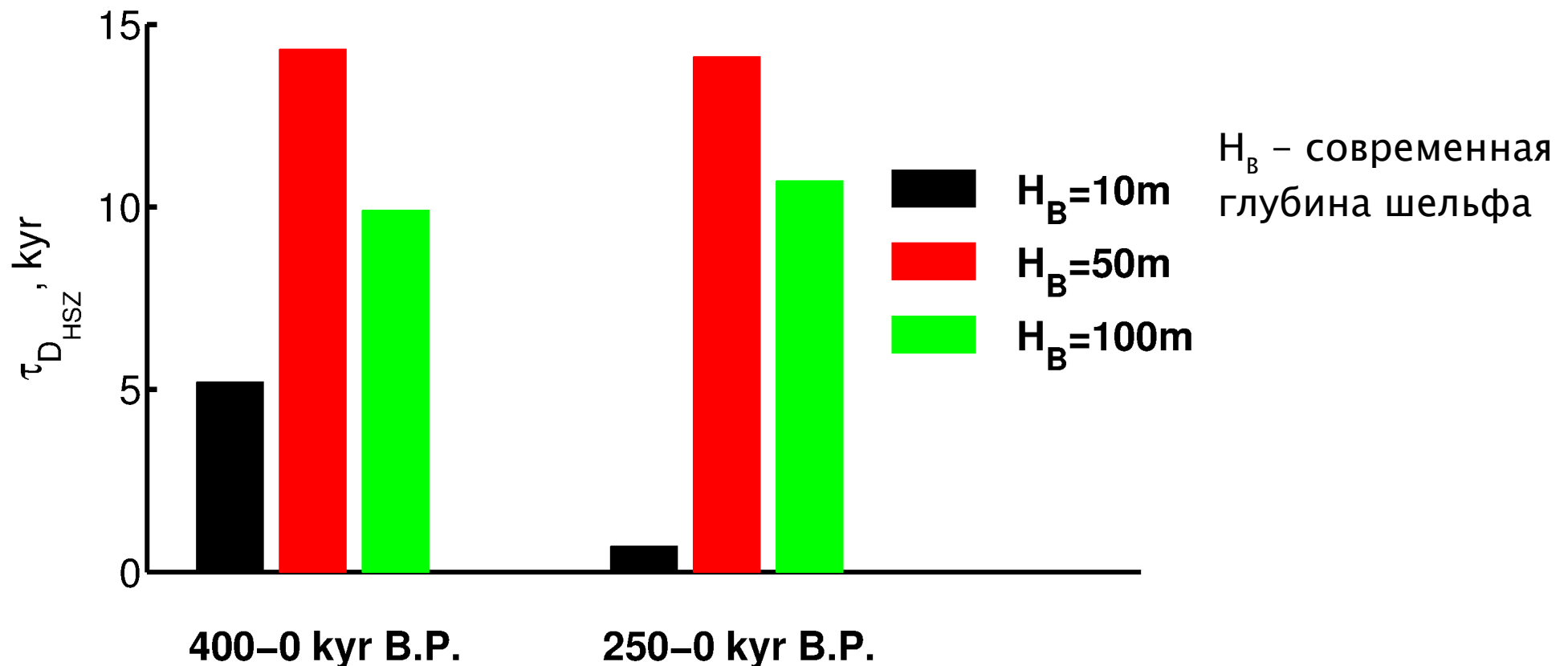


ТОЛЬКО
континентальные
окраины



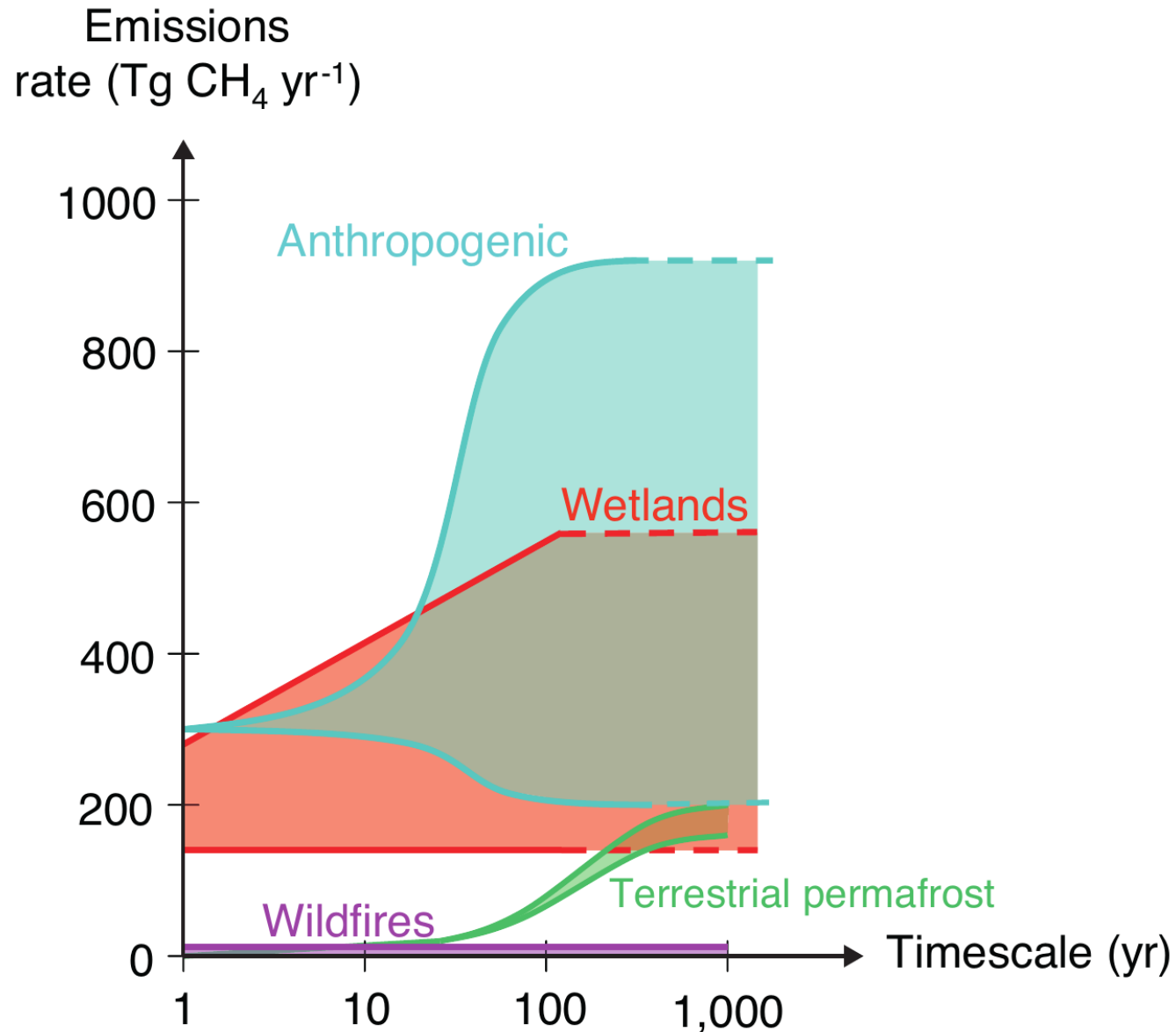
Запаздывание отклика толщины ЗСГМ относительно придонной температуры в ледниковых циклах [Malakhova and Eliseev, 2017]

(изменение придонной температуры и уровня моря по палеосценарию) +
модель термического состояния донных отложений с учётом фазовых переходов) +
(соотношения для ЗСГМ)

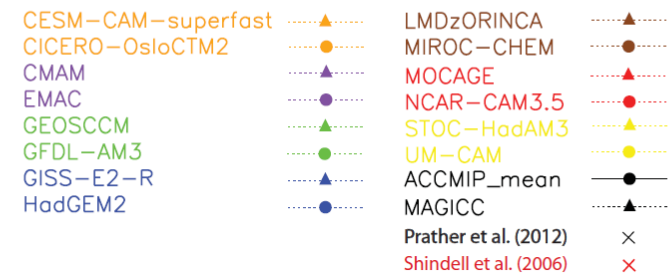
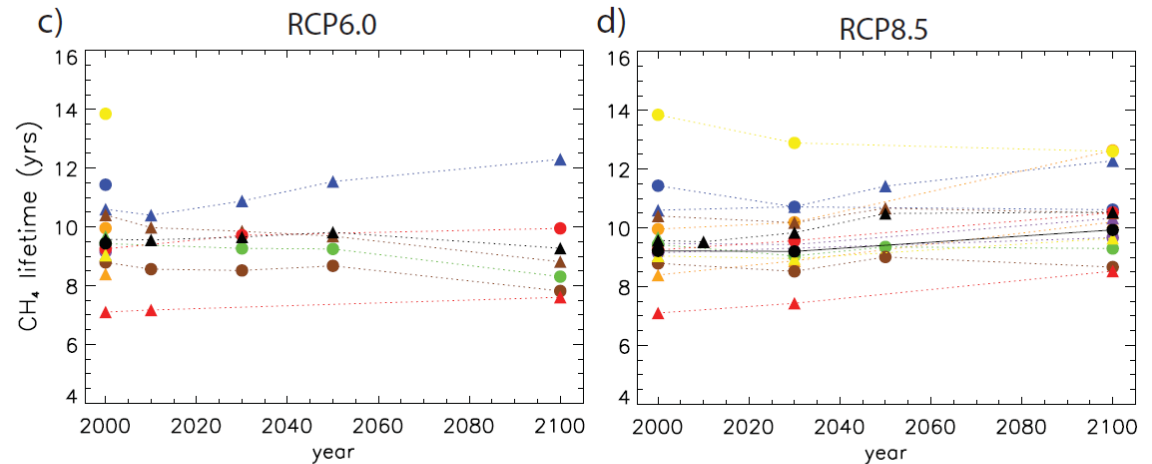
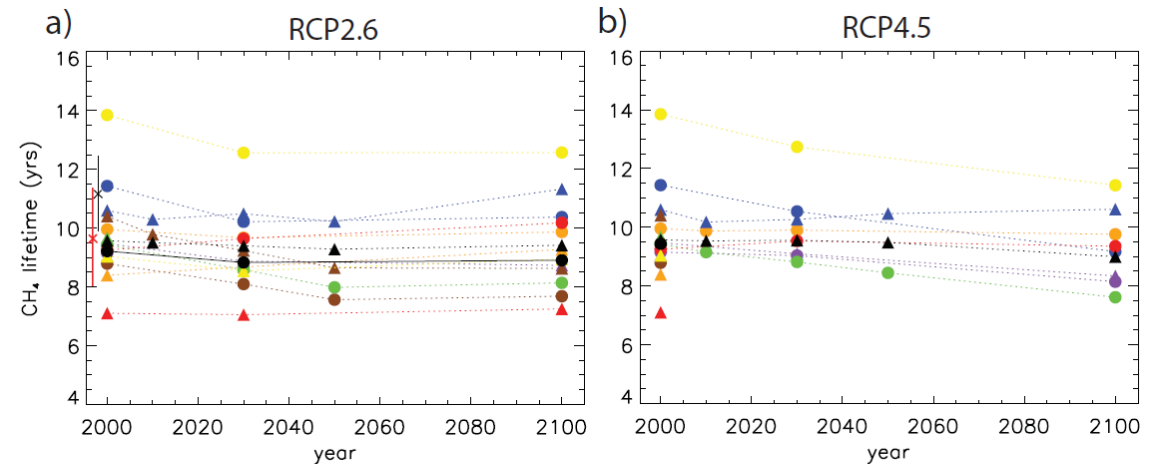
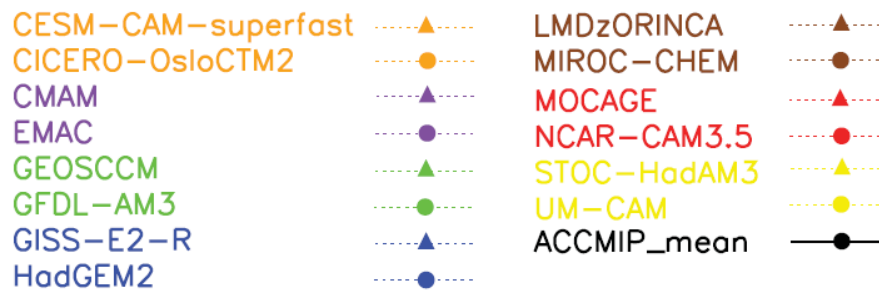
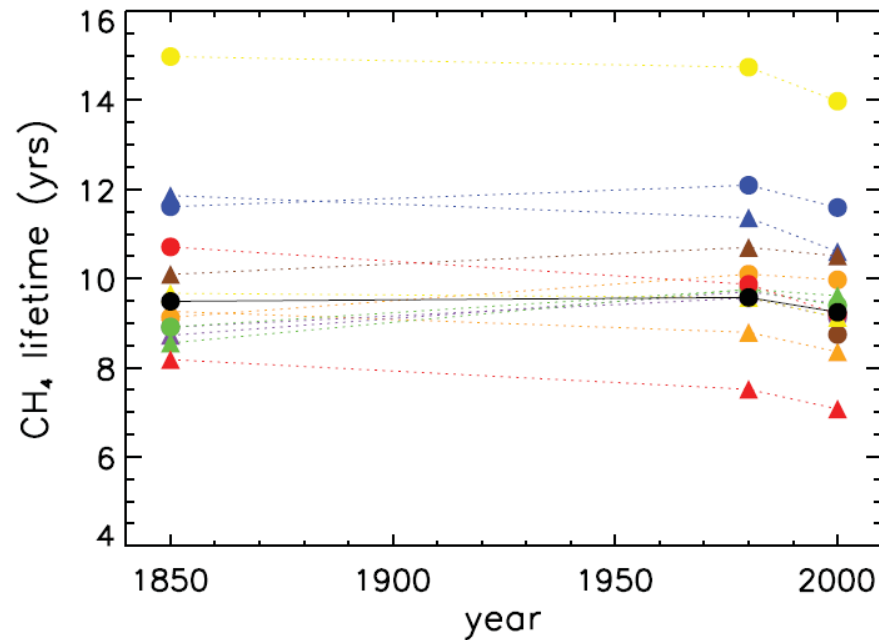


согласуется с результатами [Romanovskii et al., 2005], полученными для отдельных скважин

Запаздывание отклика МЦ на внешнее воздействие [IPCC AR5, рис. 6.36]



Время жизни CH_4 в атмосфере: проект сравнения моделей химии атмосферы ACCMIP [Voulgarakis et al., 2013]



[лет/К] (идеализированные расчёты)

| | | |
|---------------------------------------------|------------------|------------------|
| Mean \pm stand. dev. | -0.31 ± 0.14 | -0.34 ± 0.12 |
| Mean \pm stand. dev. (selected models) | -0.27 ± 0.10 | -0.28 ± 0.07 |

**Влияние метанового цикла на
климатические изменения**

РВВ метана и климатический отклик

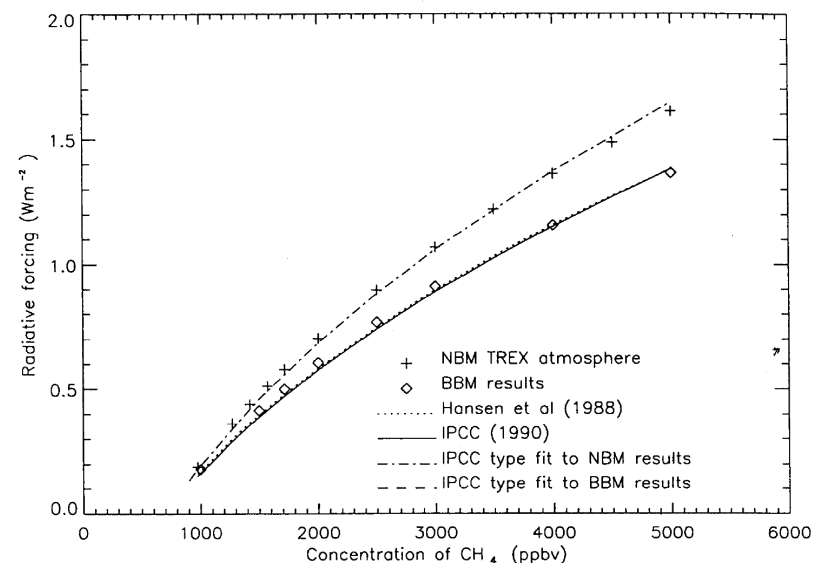
[Myhre et al., 1998]

| Simplified expression Radiative forcing, ΔF , Wm^{-2} | Constants α | |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| | IPCC | Best estimate this work ^a |
| $\Delta F = \alpha (\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) - (f(M, N_0) - f(M_0, N_0))$ | 0.036 | 0.036 |

$$f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M(MN)^{1.52}]$$

M is CH₄ in ppbv

N is N₂O in ppbv



Линейная ЭБМ:

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = \text{PВВ} \quad \text{←} \quad \text{обратные связи} \quad \text{←} \quad \lambda \Delta T$$

$$\Delta T(0) = 0$$

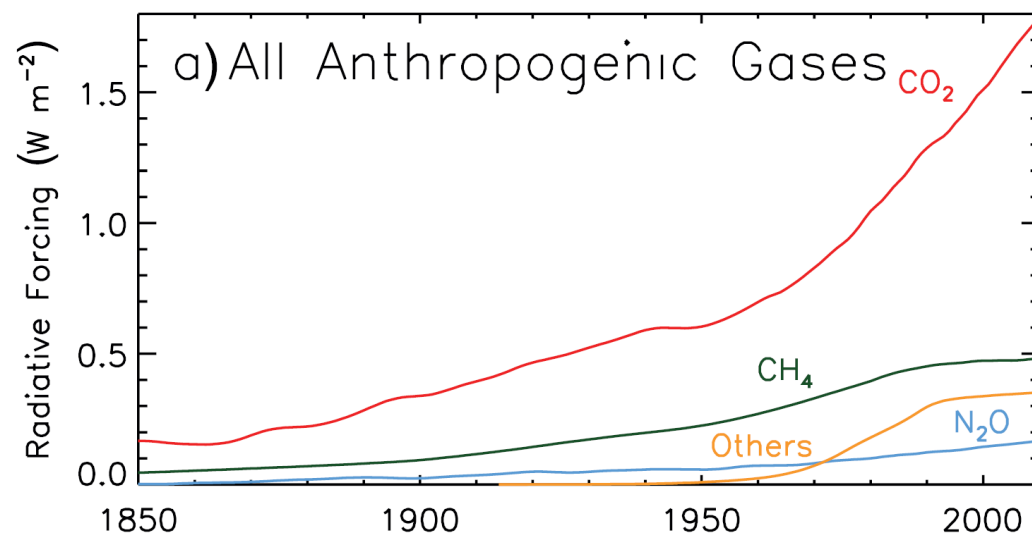
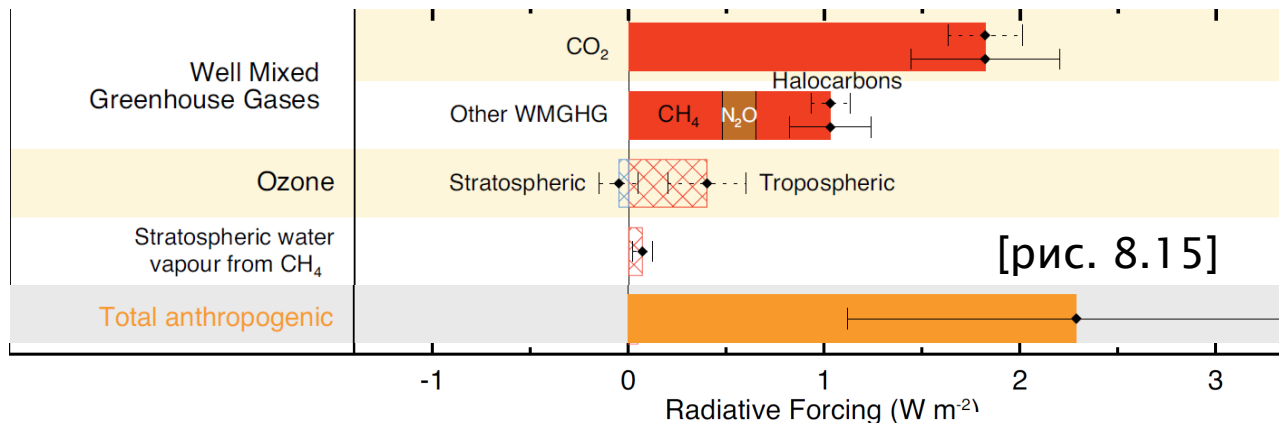
Решение

$$\Delta T(t) = C^{-1} \int_0^t R(\xi) \exp[-\lambda(\xi - t)/C] d\xi$$

⇓

основной вклад – от интервала $t - 2\lambda / C < \xi < t$

РВВ метана: 1750–2011 гг. [IPCC AR5]



Вт/м²:

прямое (изменение концентрации)

H₂O из-за окисления в стратосфере

влияние на O₃ в тропосфере

+ влияние на τ_{CH_4}

ВСЕГО

0.48 (0.43–0.53)

0.05 (0.02–0.07)

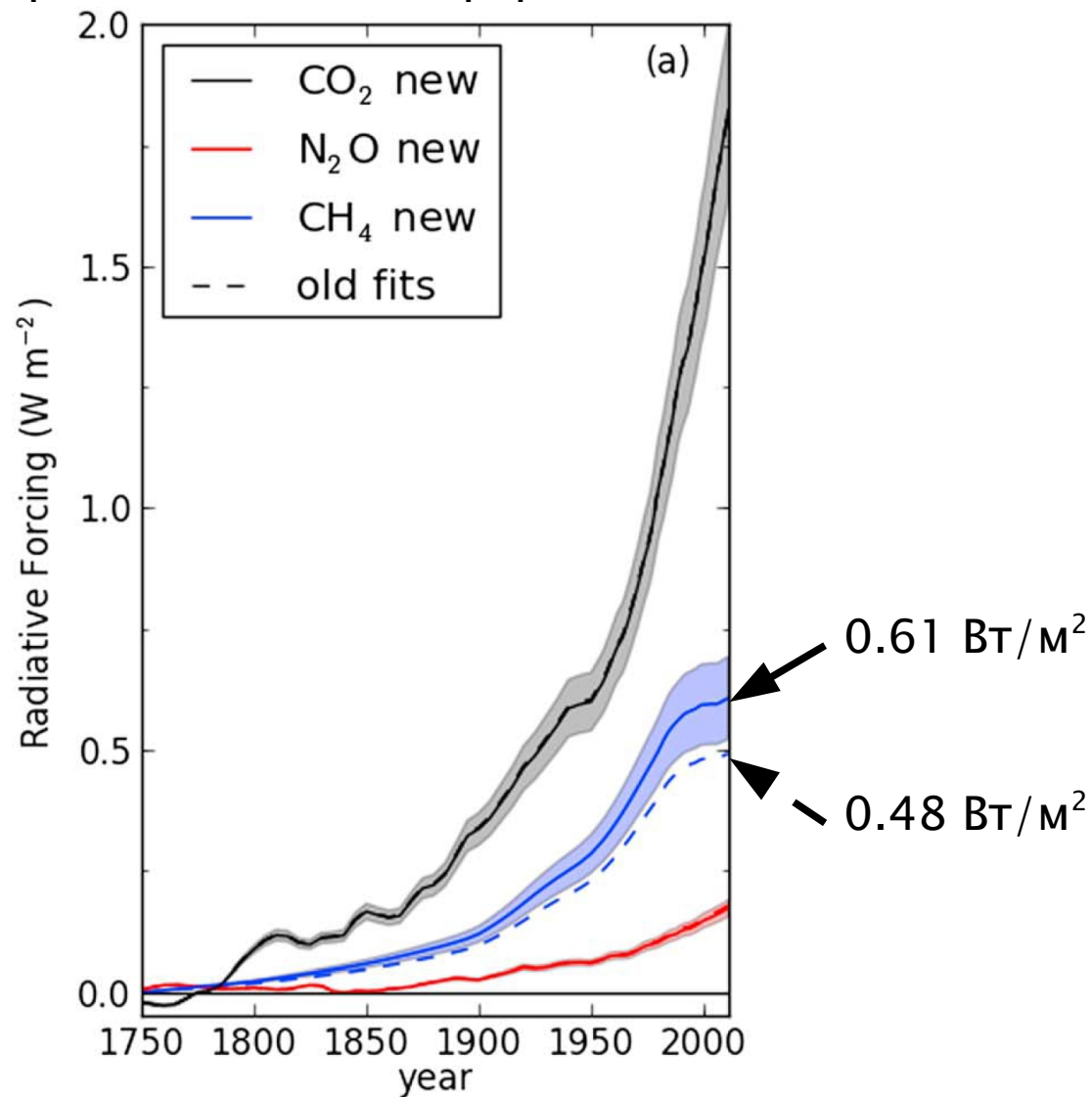
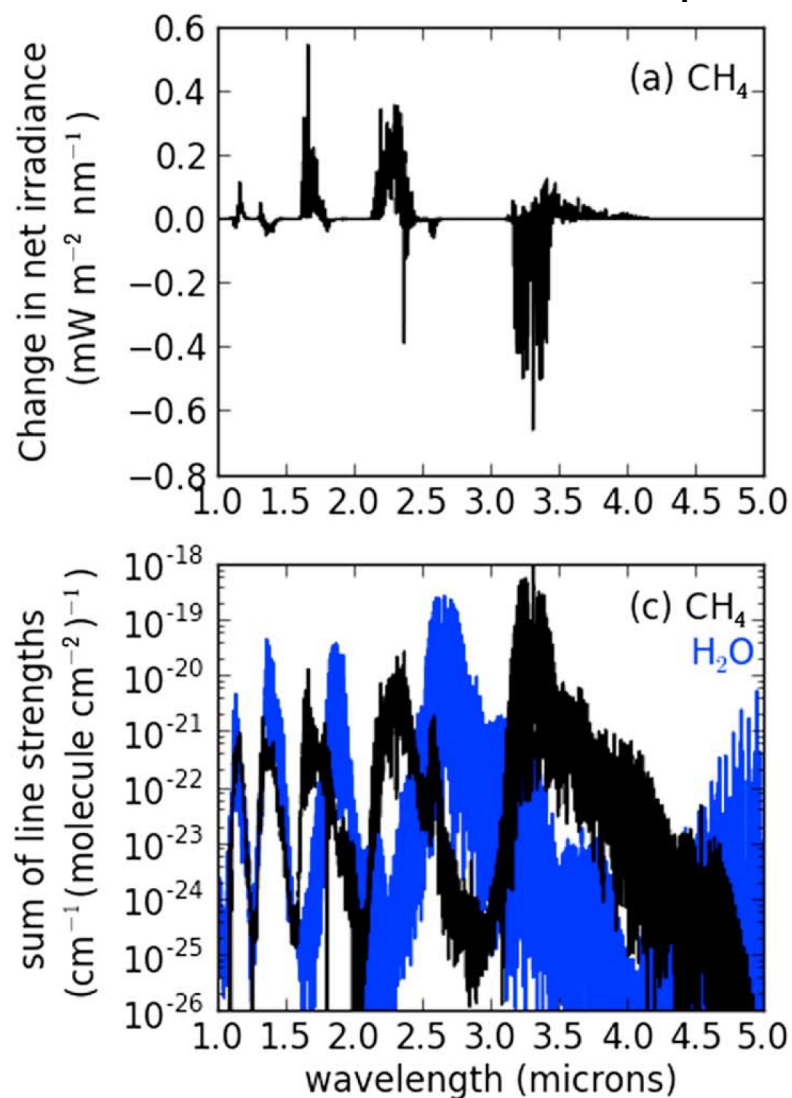
0.24 (0.11–0.37)

...

0.97 (0.80–1.14)

РВВ метана: 1750–2011 гг. [Etminan et al., 2016]

- учёт поглощения КВ-радиации метаном
- новые спектроскопические данные о континууме H_2O
- полилинейная модель переноса радиации в атмосфере OLBL

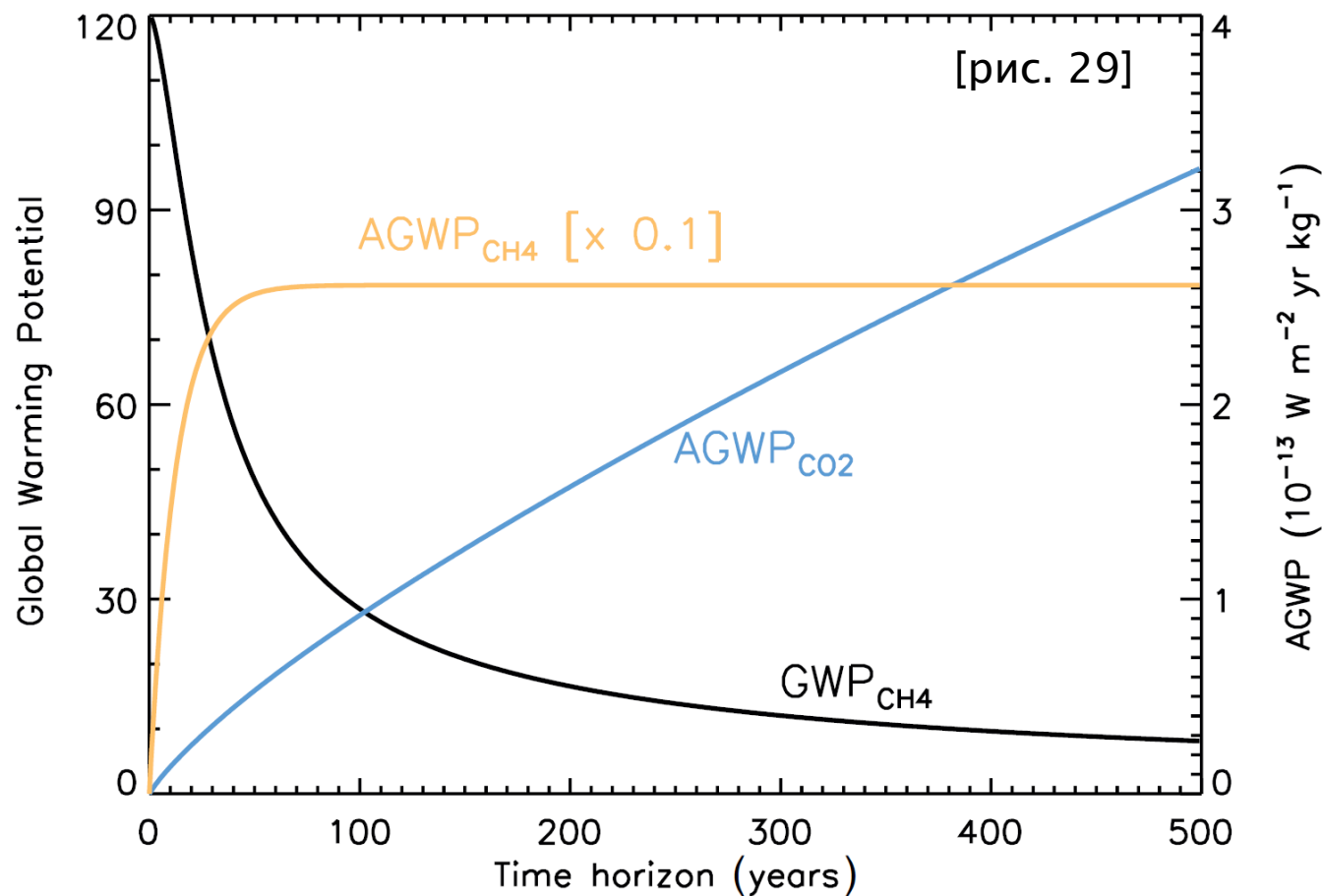


GWP и GTP метана [IPCC AR5]

$$AGWP_x(t) = \int_0^t RF_x dt$$

$$GWP_x(t) = AGWP_x(t) / AGWP_{CO_2}(t)$$

$$GTP_x(t) = \Delta T_x(t) / \Delta T_{CO_2}(t)$$



GWP_{CH4} (табл. 8.7):

| | |
|---------|----|
| 20 лет | 84 |
| 100 лет | 28 |

GTP_{CH4} (табл. 8.7):

| | |
|---------|----|
| 20 лет | 67 |
| 100 лет | 4 |

ОС между климатом и МЦ: определение

С моделью земной системы проводятся 2 расчёта при одном и том же сценарии внешних эмиссий E_a :

- (с): используется полная модель со взаимодействующими между собой климатом и МЦ.
- (u): МЦ не зависит от состояния климата.

Параметр обратной связи

$$f_q = \Delta q_{\text{CH}_4}^{(c)} / \Delta q_{\text{CH}_4}^{(u)}.$$

или

$$f_T = \Delta T^{(c)} / \Delta T^{(u)}.$$

(Δ - изменение переменной в период интегрирования модели).

$f_q > 1 \quad \Rightarrow \quad$ изменения климата интенсифицируют увеличение q_{CH_4} и отклик климата (положительная ОС)

$f_q < 1 \quad \Rightarrow \quad$ изменения климата подавляют увеличение q_{CH_4} и отклик климата (положительная ОС)

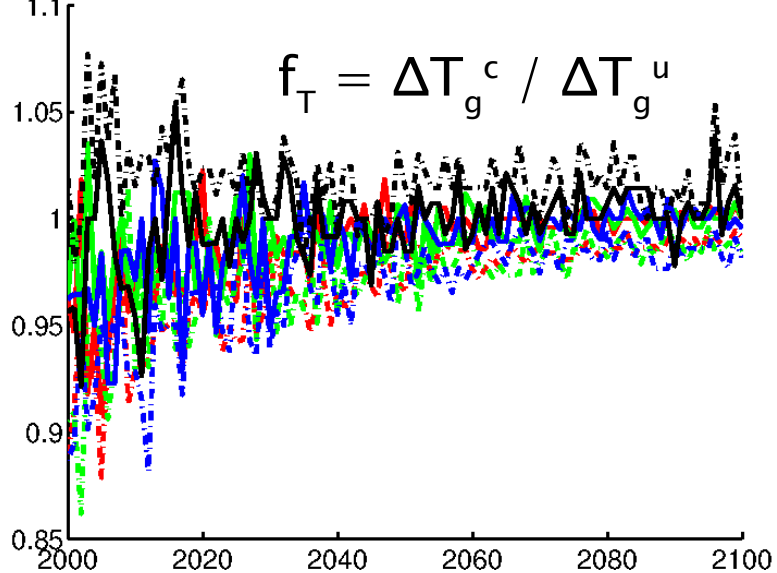
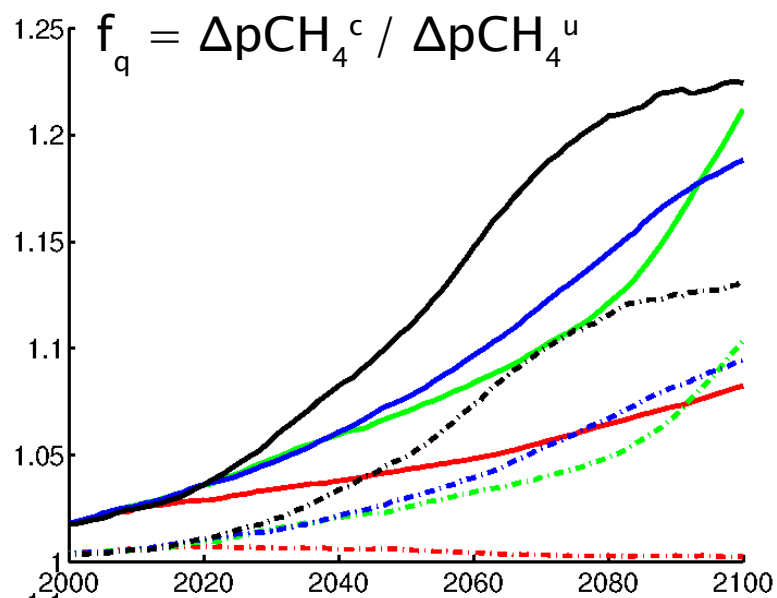
ОС между климатом и МЦ: результаты КМ ИФА РАН [Денисов и др., 2013]

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).

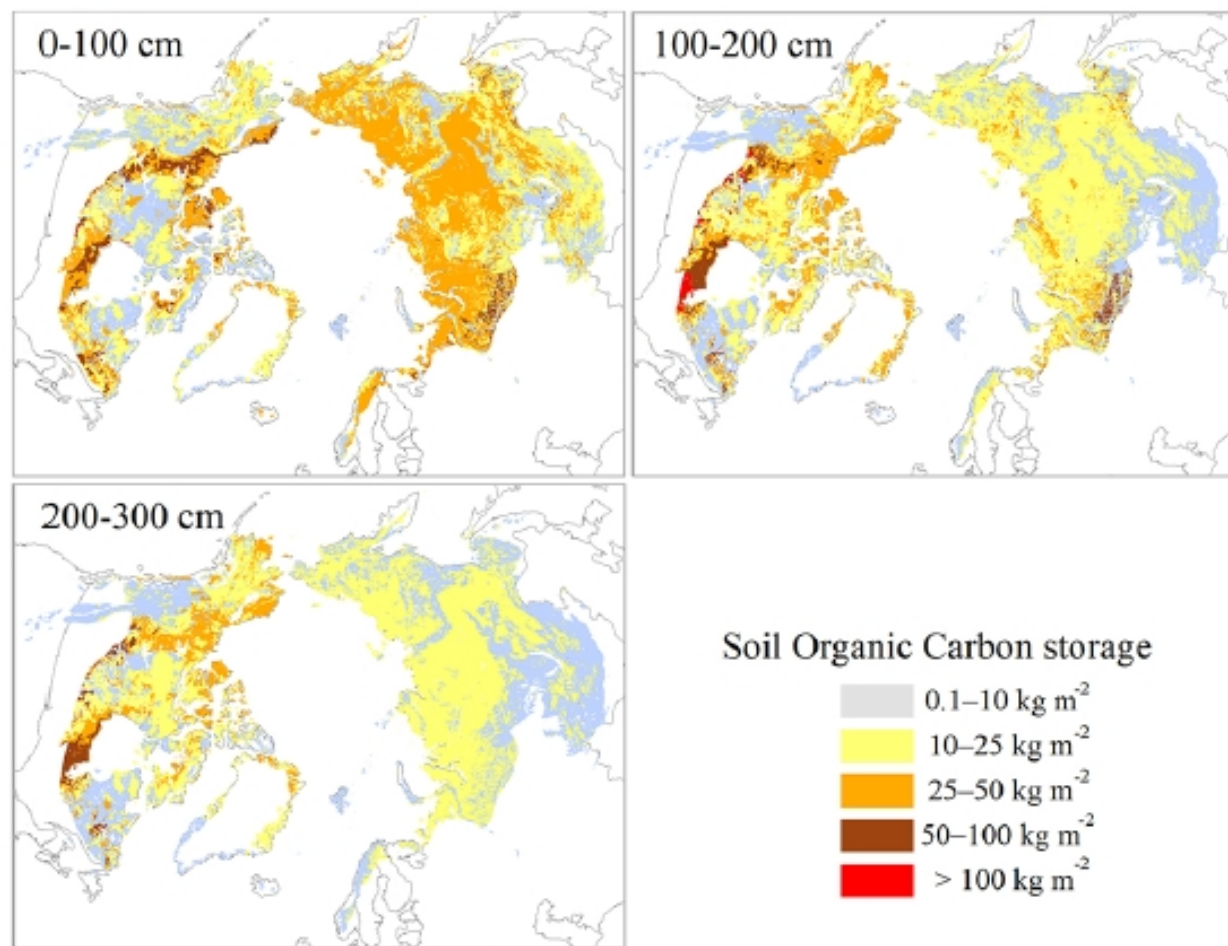
Аналогичные результаты получены и с моделью общей циркуляции ИВМ РАН.

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



- RCP 2.6
 - RCP 4.5
 - RCP 6.0
 - RCP 8.5
- сплошная линия:
 $\tau_{\text{CH}_4} = \text{const}$
- штрихпунктир: функция Аррениуса
 $\tau_{\text{CH}_4} \propto \exp(-T^{(0)} / T)$

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

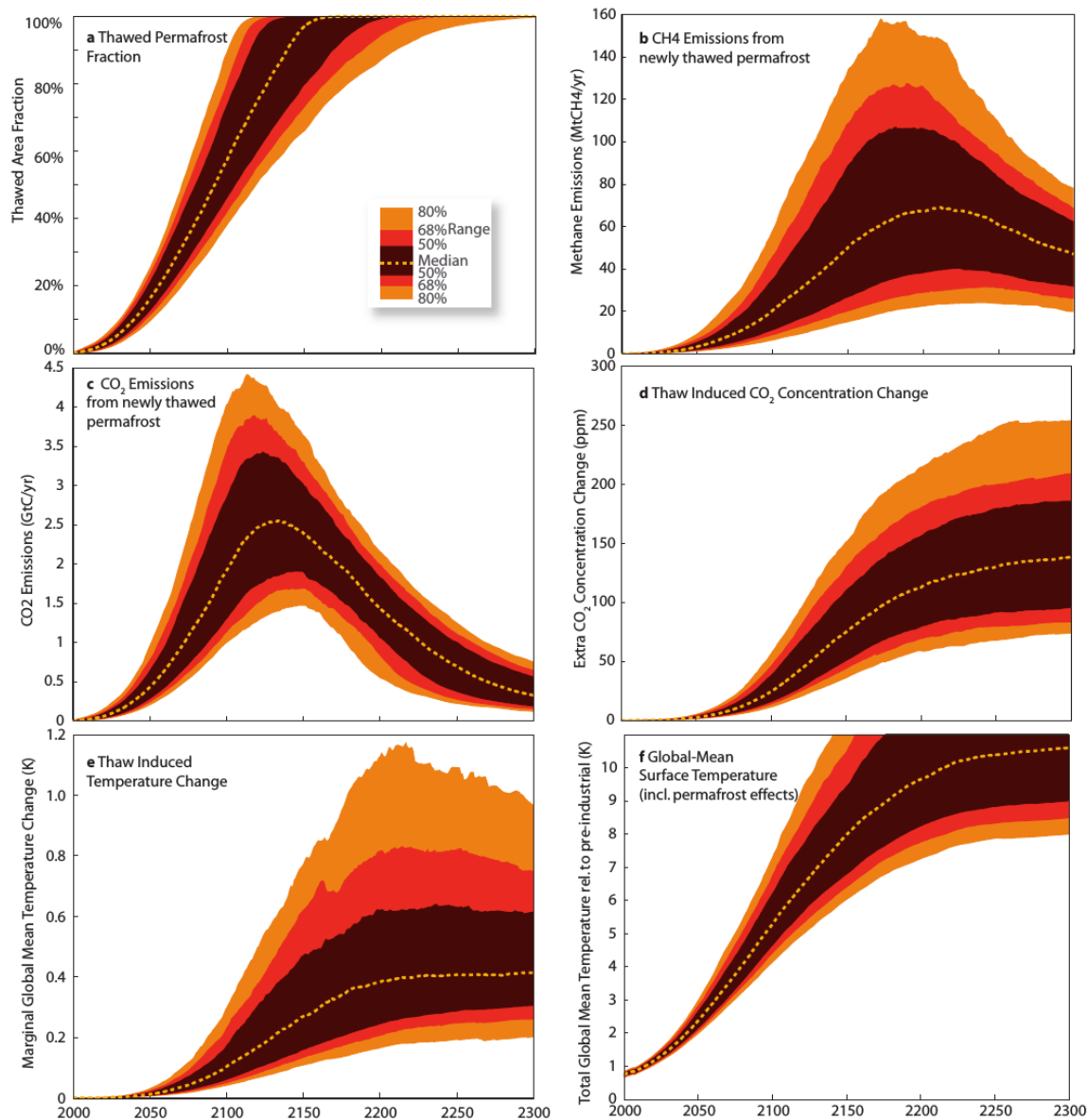
всего: 1400–1850 ПгС

всего: 1672 ПгС

глобально: 2344 ПгС [Jobbágy and Jackson, 2000]

Таяние вечной мерзлоты при потеплении климата вовлечёт в активное разложение углерод из более глубоких слоёв и, в случае анаэробного разложения, приведёт к дополнительному выделению CH_4

Выделение CH_4 из почвы при таянии вечной мерзлоты [Schneider von Deimling et al., 2012] (MAGICC6, RCP 8.5)

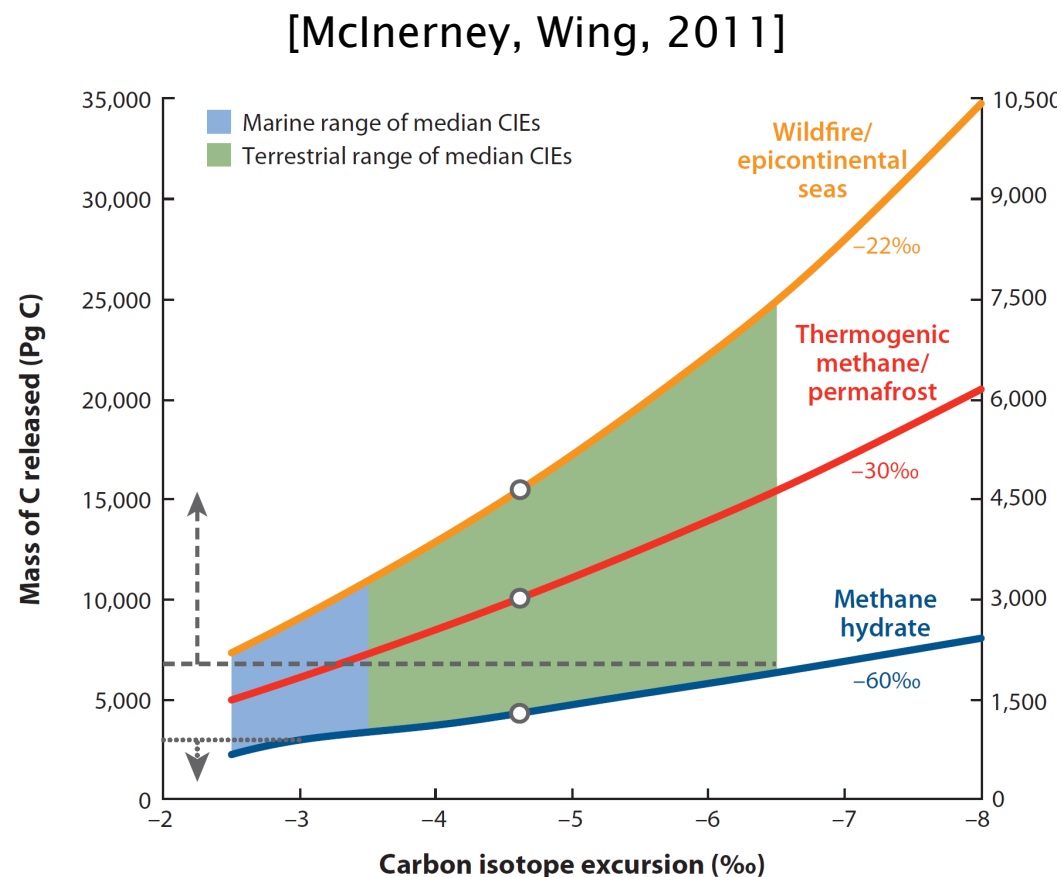
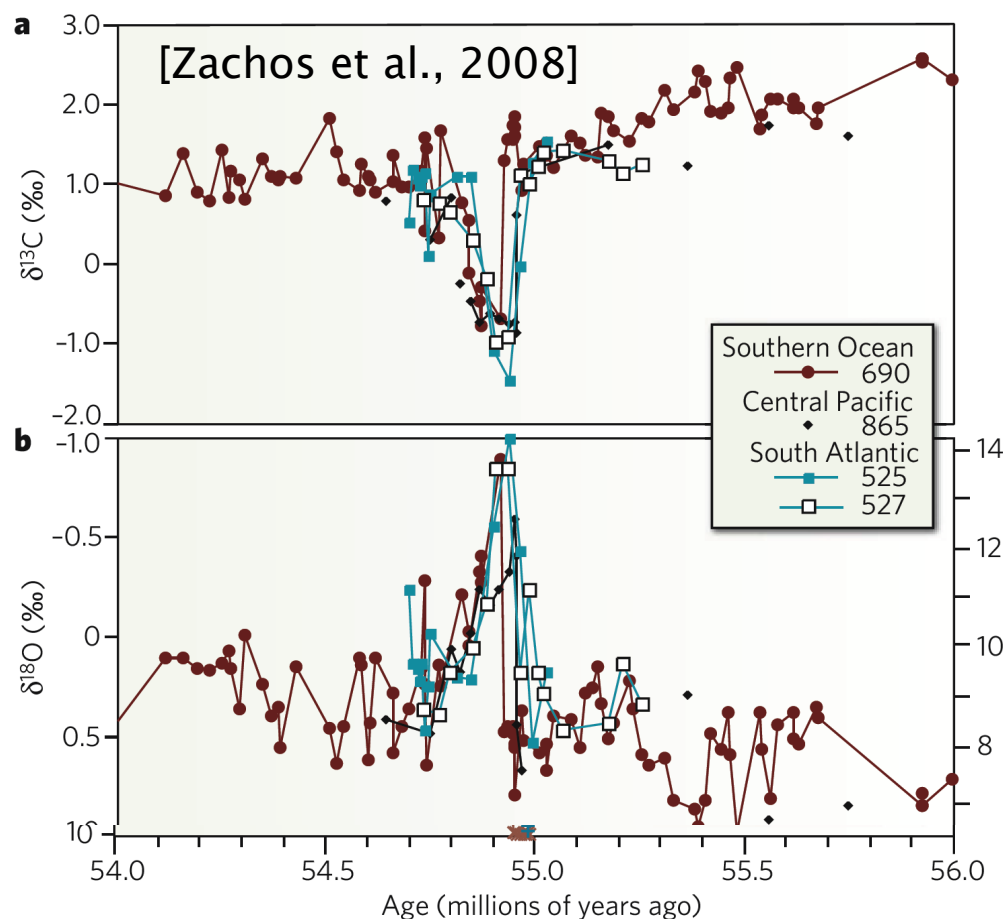


⇒

слабая ОС

Термический оптимум 55 млн. лет назад

- $\delta^{18}\text{O}$: Нагрев верхнего и придонного слоёв океана на 4–8°C
- $\delta^{13}\text{C}$ уменьшилась на 2.5–5‰ за время < 10 тыс. лет, затем восстановилась за 120–220 тыс. лет [O'Connor et al., 2010]
- вероятная причина – выделение CH_4 с последующим окислением до CO_2
- $$M_{\text{added}} = -\delta^{13}\text{C} M_{\text{initial}} / (\delta^{13}\text{C}_{\text{final}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{added}})$$



Заключение

- МЦ играет существенную роль в динамике земной системы. Это связано с i) взаимодействием МЦ с другими биогеохимическими циклами, в том числе с циклом CO_2 , ii) зависимостью характеристик МЦ от состояния климата, iii) влиянием метана в атмосфере на перенос радиации.
- Важнейшим естественным источником метана служат болота и влажная почва, интенсивность выделения CH_4 которых сильно зависит от состояния климата и быстро откликается на изменения последнего.
- Потенциально важным для климата резервуаром метана также являются метангидраты. Однако временной масштаб их отклика на изменения климата равен, по крайней мере, нескольким тысячам лет.
- В индустриальный период содержание метана в атмосфере выросло в 2.5 раза, прежде всего из-за антропогенных эмиссий этого газа.
- В последние годы активно разрабатываются схемы интерактивного МЦ для глобальных климатических моделей.
- Существующие оценки интенсивности обратной связи указывают на её значимость для химических процессов в атмосфере, но позволяют сделать выводы о её слабости для задач изменения климата. Тем не менее, нельзя исключать роли МЦ в значительных климатических вариациях прошлого (например, в формировании климатического оптимума 55 млн. л.н.).