



Исследование линейности и обратимости отклика климатической системы на выбросы CO₂, заданные по протоколам ESM-FLAT10, в модели земной системы ИВМ РАН

Кострыкин С.В.^{1,2,3}(s_kostr@mail.ru), Тарасевич М.А.^{1,4}, Черненко А.Ю.^{1,3}, Володин Е.М.^{1,3}

¹ Институт Вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д.8

² Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля,
Россия, 107058, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

³ Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4

⁴ Гидрометцентр России,
Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, стр.1

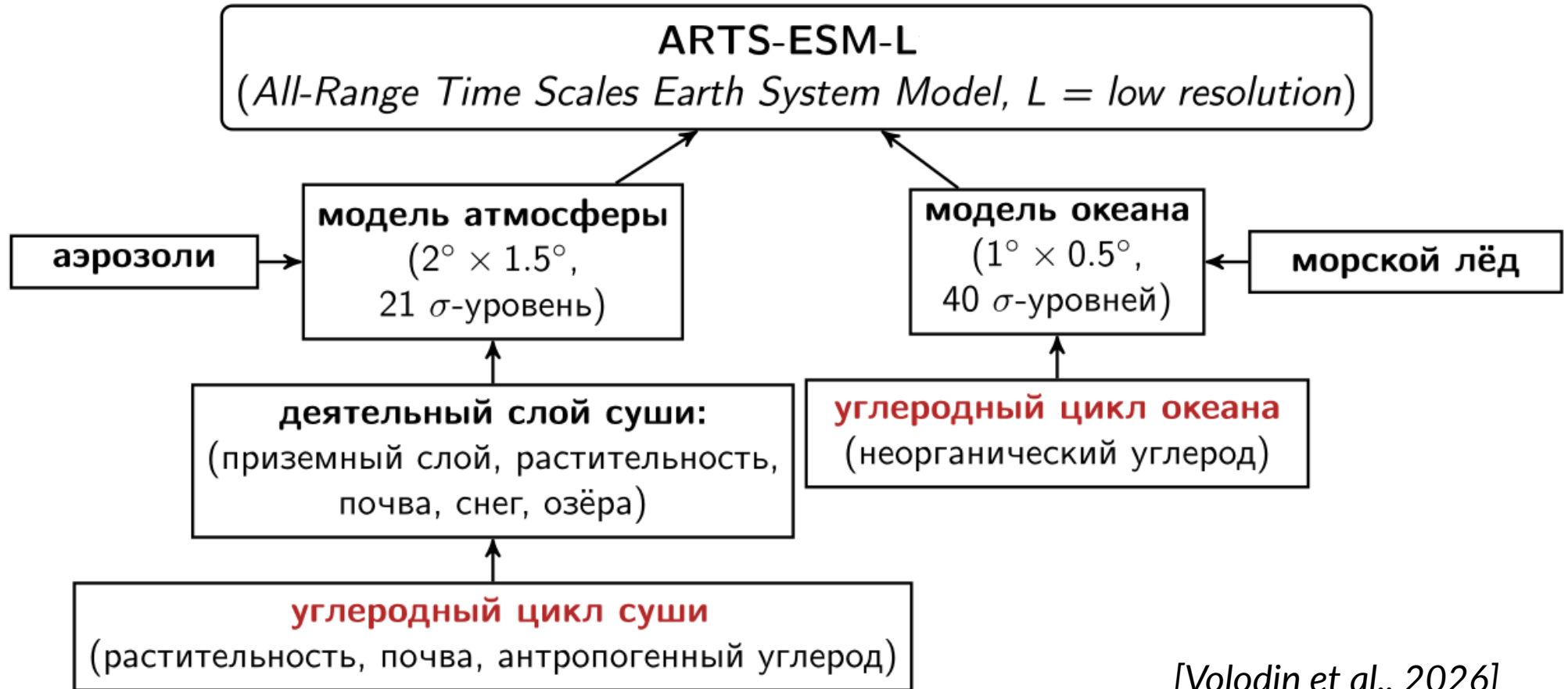
Международная конференция «Физика атмосферы и климата»,
посвященная 70-летию Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Кисловодск, 6-8 апреля 2026г.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ №25-17-00203.

Мотивация

- 1) В связи с возможностью использования в будущем технологии удаления CO_2 из атмосферы, возникает вопрос - насколько обратимо глобальное потепление на региональном и глобальном масштабах в случае использования симметричного по времени источника эмиссии?
Как при этом перераспределяется углерод между резервуарами глобального углеродного цикла?
- 2) Насколько хорошо результаты МЗС ИВМ РАН согласуются с результатами других климатических моделей?

Блок-схема модели ARTS-ESM-L

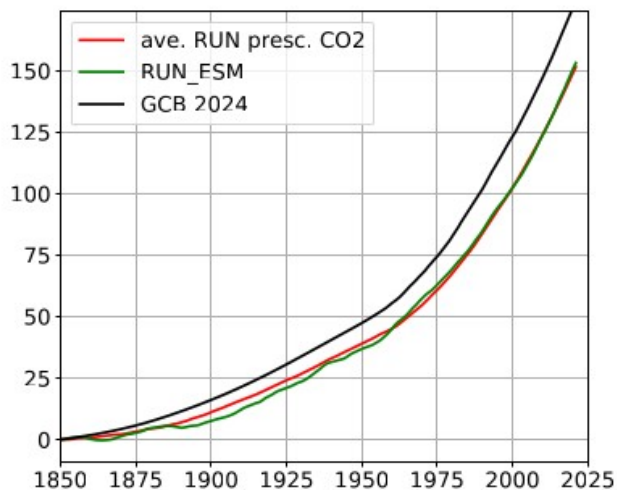


[Volodin et al., 2026]

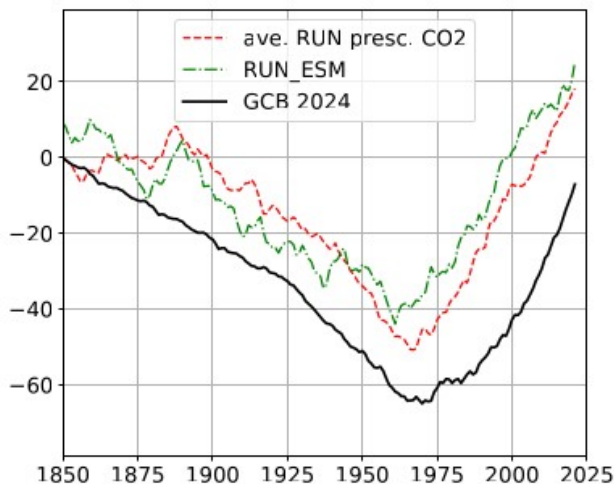
Глобальный углеродный цикл в модели ARTS-ESM-L

Подробное описание углеродного цикла в модели ARTS-ESM приведено в работах [Володин, 2007; Черненко и др., 2025]

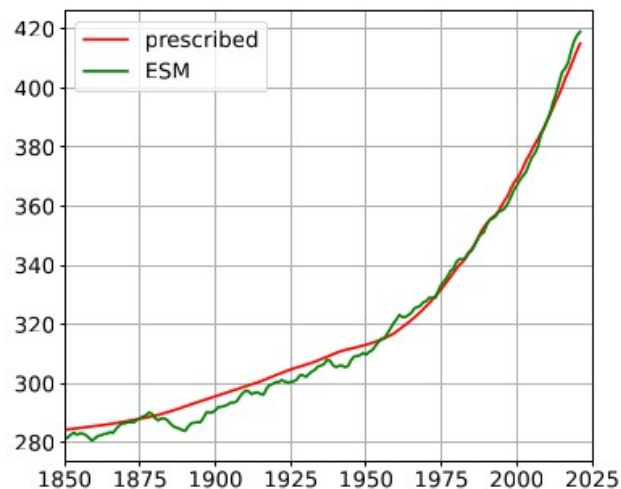
Компоненты углеродного цикла ARTS-ESM-L в историческом эксперименте (1850–2021 гг.)



Изменение запасов углерода
в Мировом океане (Гт С)
(относительно 1850 г.)



Изменение запасов углерода
в наземных экосистемах (Гт С)
(относительно 1850 г.)

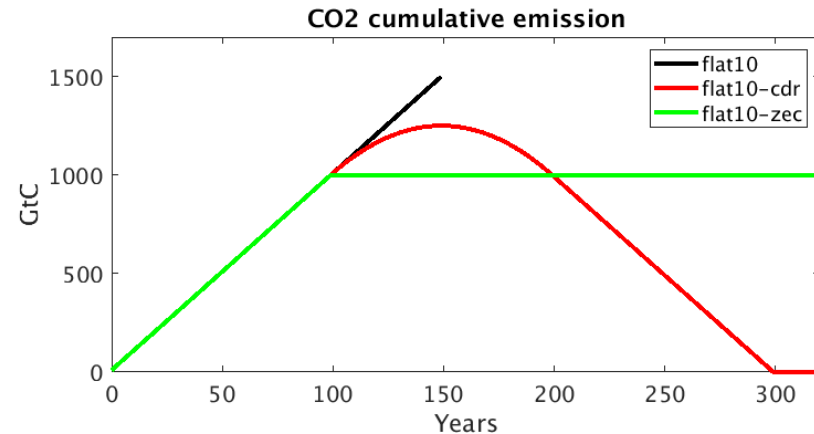
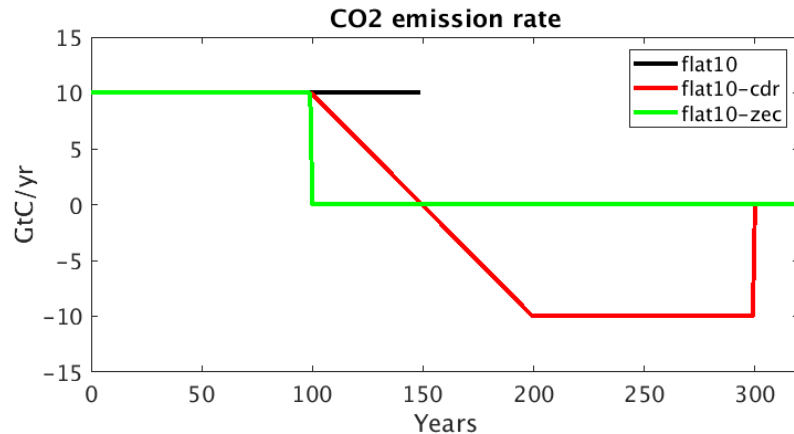


Концентрация CO_2
в атмосфере (ppm)
(RMSE = 3.3 ppm, $R_{\text{corr}} = 0.998$)

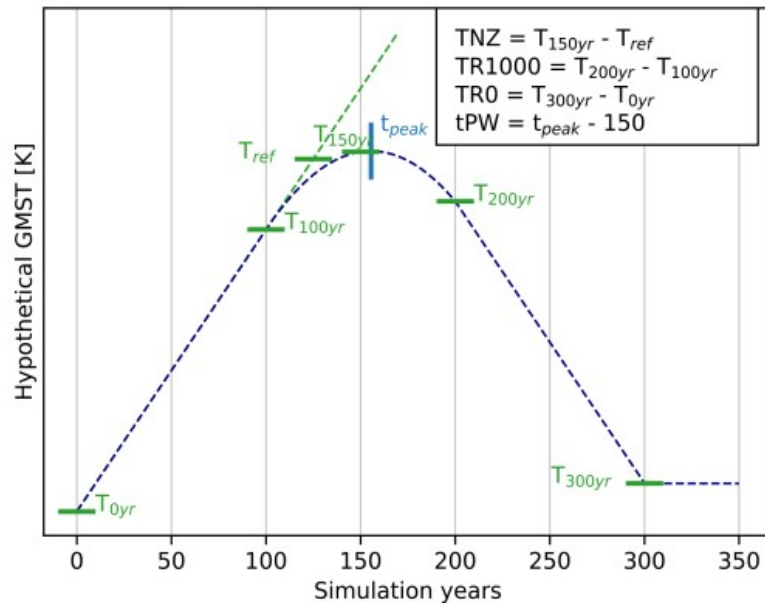
Сценарии экспериментов FLAT10MIP

В работе [Sanderson et al, 2025] были предложены протоколы для экспериментов с МЗС FLAT10MIP.

- 1) Расчеты проводятся МЗС с интерактивным углеродным циклом и продолжительностью максимально на 320 лет.
- 2) Все начальные данные и внешние воздействия, кроме эмиссии диоксида углерода, соответствуют преиндустриальному эксперименту.
- 3) Эмиссия диоксида углерода задается по трем разным сценариям: FLAT10, FLAT10-CDR, FLAT10-ZEC.



Метрики асимметрии временного хода глобальной температуры в эксперименте FLAT10-CDR



[Sanderson et al., 2025]

Метрика климатического отклика -
Transient climate response
to cumulative CO2 emission:

$$TCRE = \frac{\Delta T(t)}{E(t)}$$

**Не зависит от времени и сценария
эмиссии CO2**

В случае идеальной линейной зависимости и обратимости глобальной температуры все метрики асимметрии должны равняться нулю.

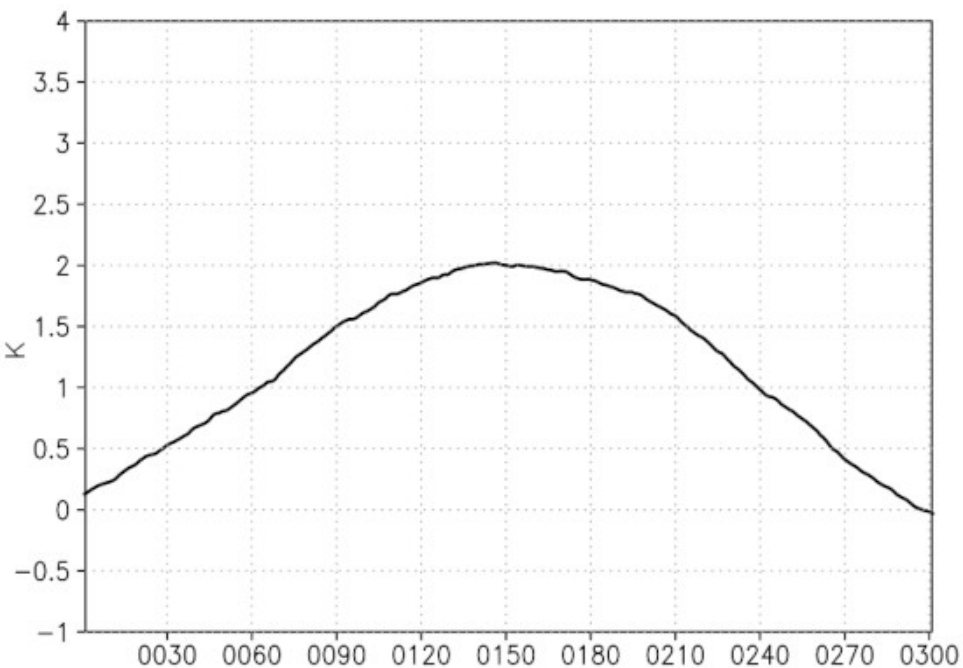
Основные метрики, полученные из экспериментов FLAT10MIP,
по данным различных моделей Земной системы из проекта CMIP6

Название МЗС	TCRE, К/ТtC	TPW, годы	TNZ, К	TR1000, К	TR0, К
ACCESS-ESM1-5	1.75	7.0	0.08	0.23	0.15
CESM2	1.95	-10.0	0.05	0.03	0.52
GFDL-ESM4	1.45	-29.0	-0.09	-0.25	0.03
GISS	1.62	-4.0	0.12	0.01	-0.35
NorESM2-LM	1.18	-33.0	-0.03	-0.23	-0.24
MPI-ESM1-2-LR	1.50	1.0	-0.06	-0.24	-0.28
CNRM-ESM2-1	1.72	-10.0	0.11	0.03	0.37
UKESM	2.50	-1.0	0.16	0.48	0.42
UVic-ESCM-2-10	1.86	3.0	0.07	0.20	0.25
HadCM3LC-Bris	1.53	6.0	0.03	-0.06	-0.04
ARTS-ESM-L	1.61	-5.0	0.02	0.09	-0.04
IPCC AR6	1.65[1-2.3]				

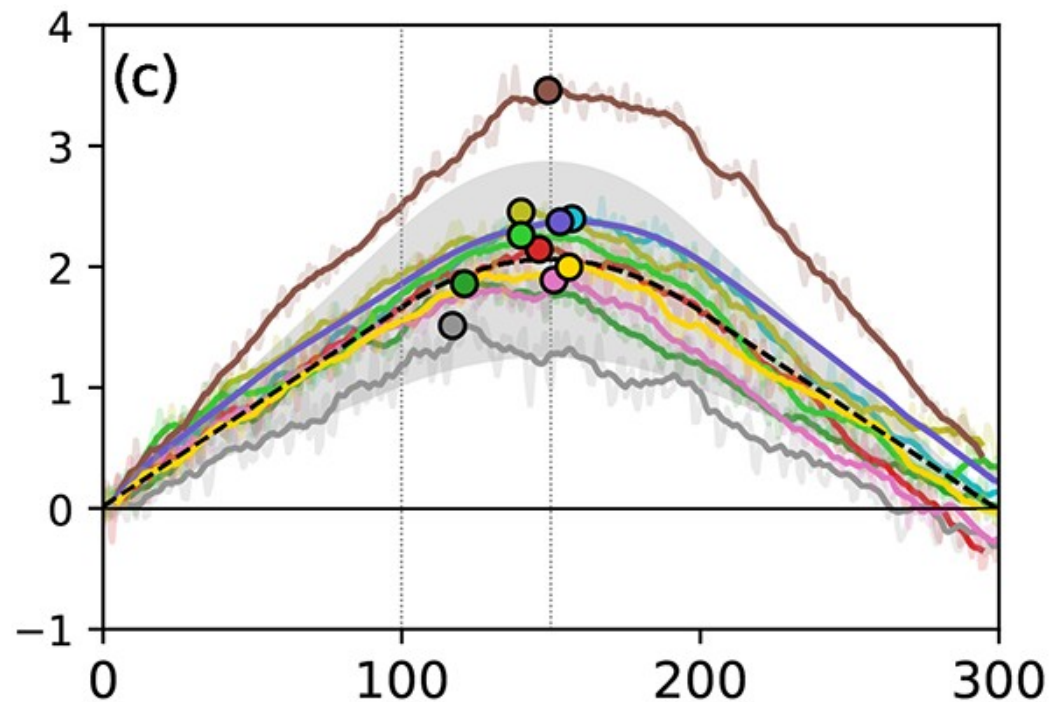
Сравнение результатов ARTS-ESM-L с данными других моделей

Приземная температура (20-ти летнее бегущее среднее)

ARTS-ESM-L



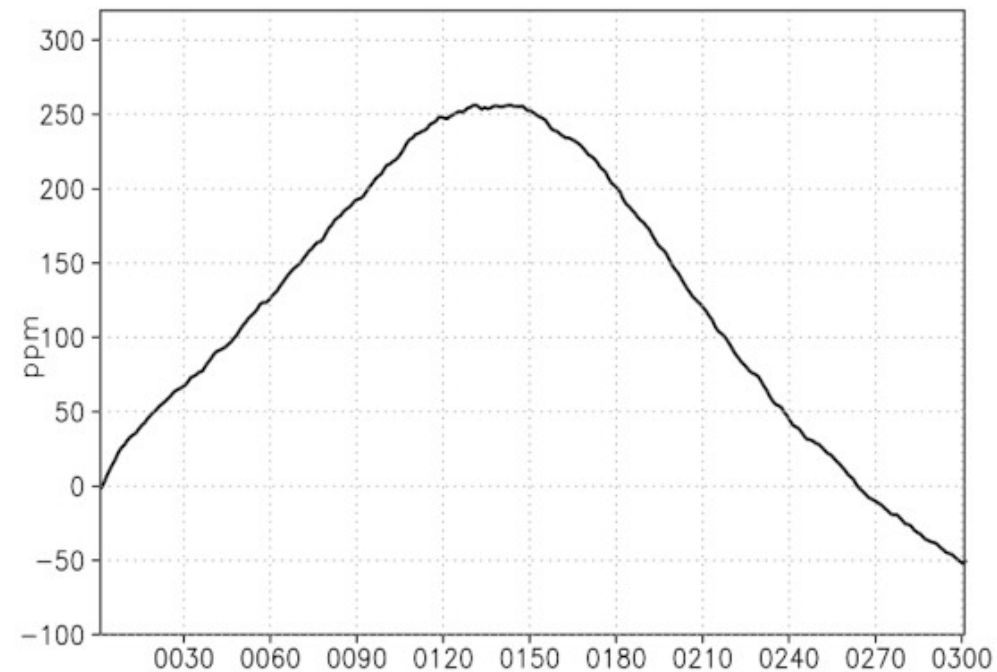
CMIP6 ESMs



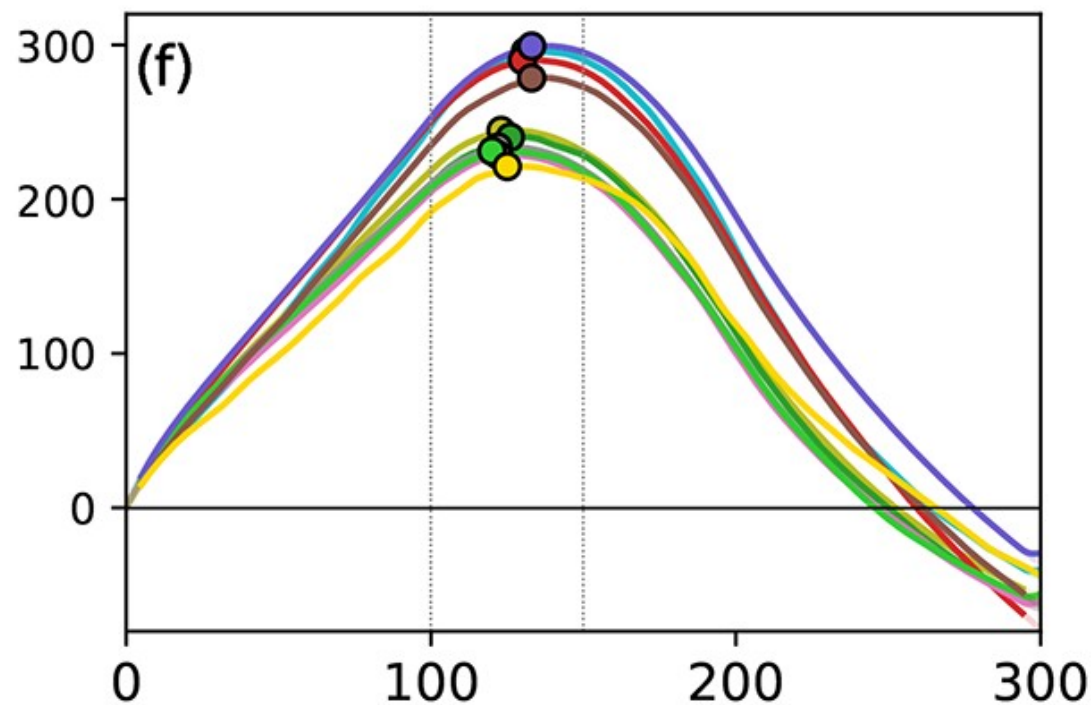
Сравнение результатов ARTS-ESM-L с данными других моделей

Концентрация CO₂ в воздухе

ARTS-ESM-L



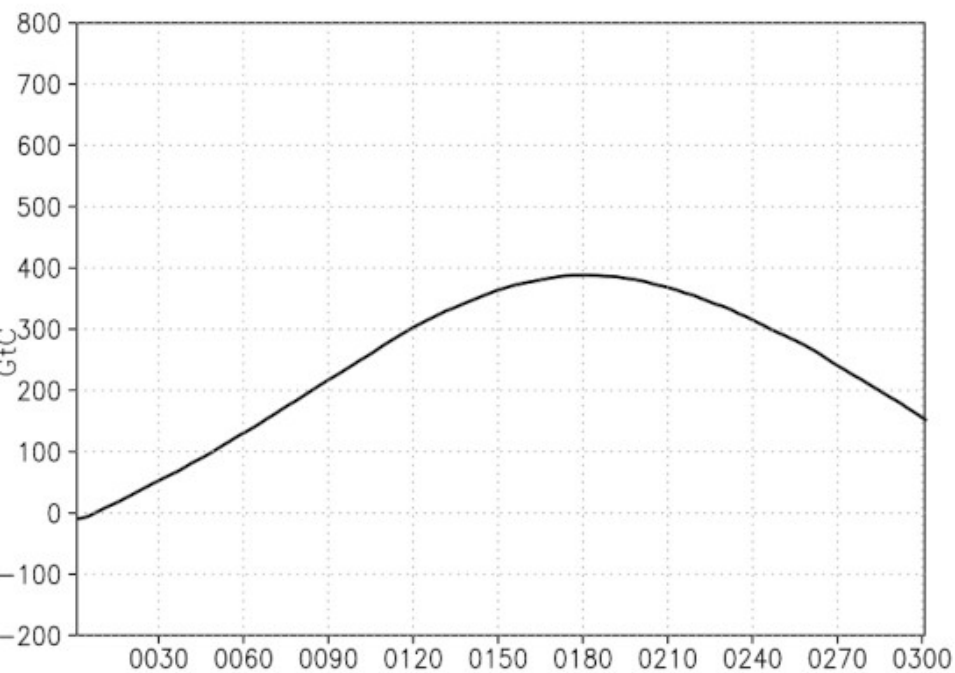
CMIP6 ESMs



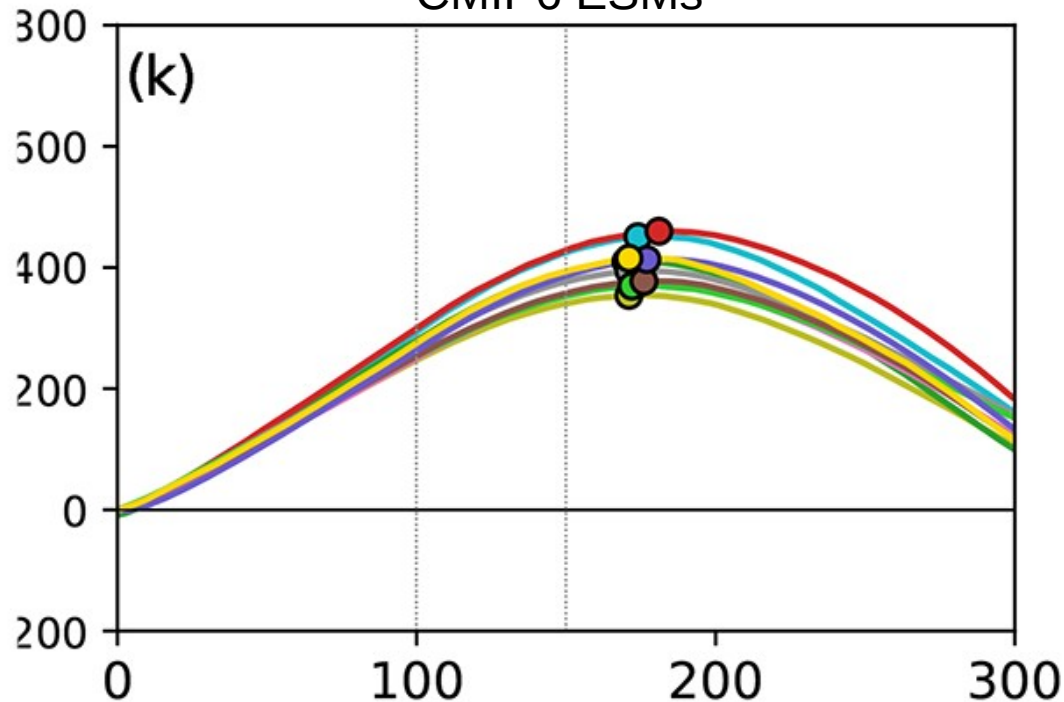
Сравнение результатов ARTS-ESM-L с данными других моделей

Изменение запаса углерода в океане

ARTS-ESM-L



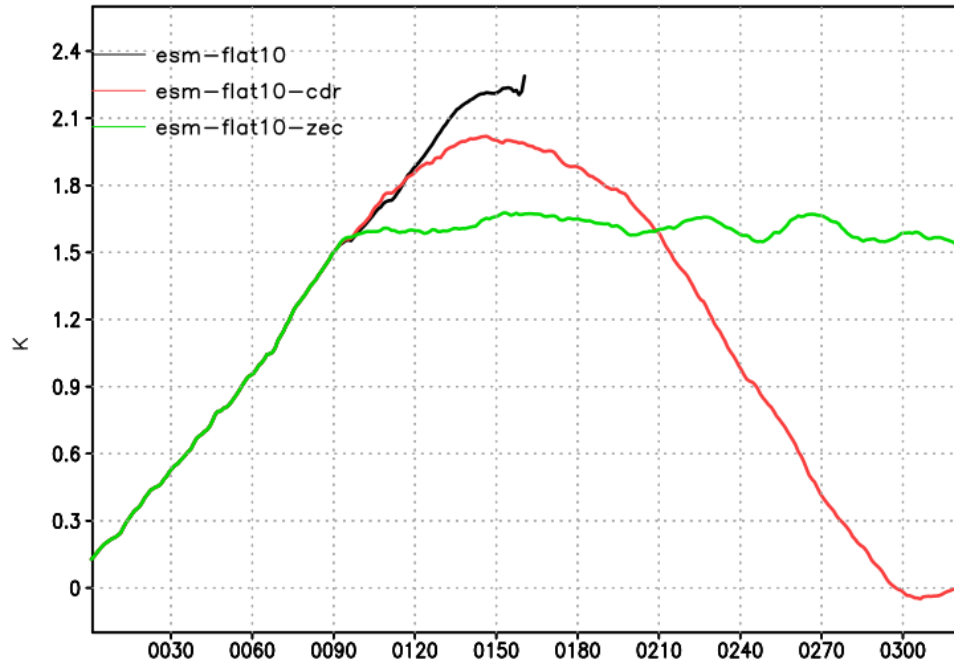
CMIP6 ESMs



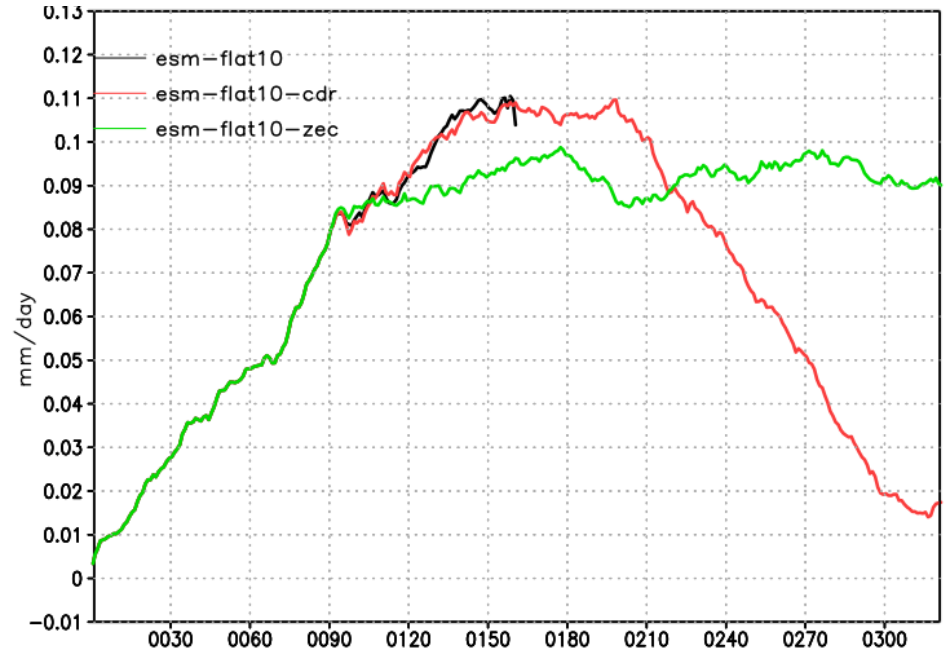
Данные модели ARTS-ESM-L

Временной ход аномалии глобальной приземной температуры (а) и интенсивности осадков (б) в экспериментах FLAT10, FLAT10-CDR, FLAT10-ZEC

а) приземная температура



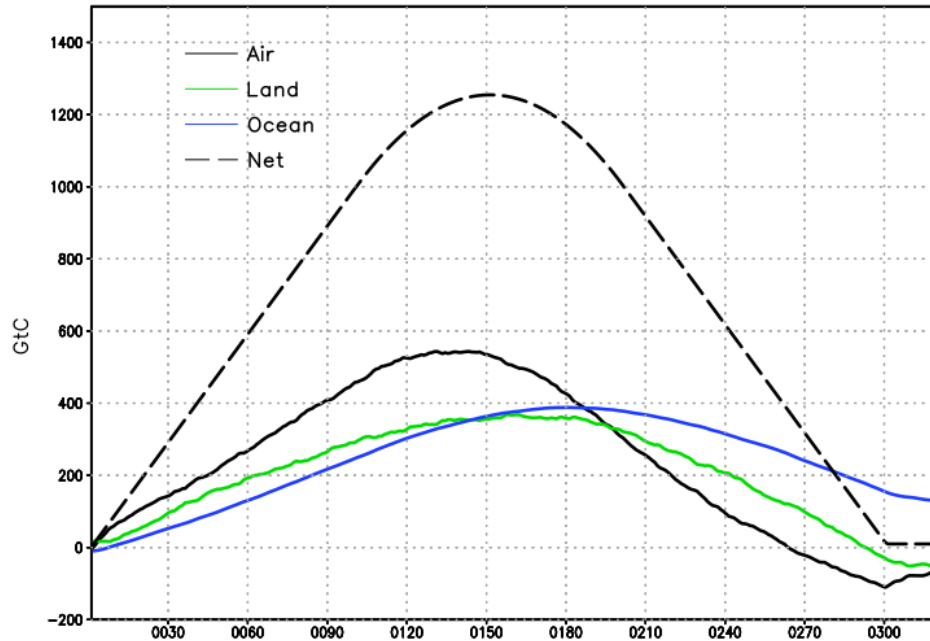
б) интенсивность осадков



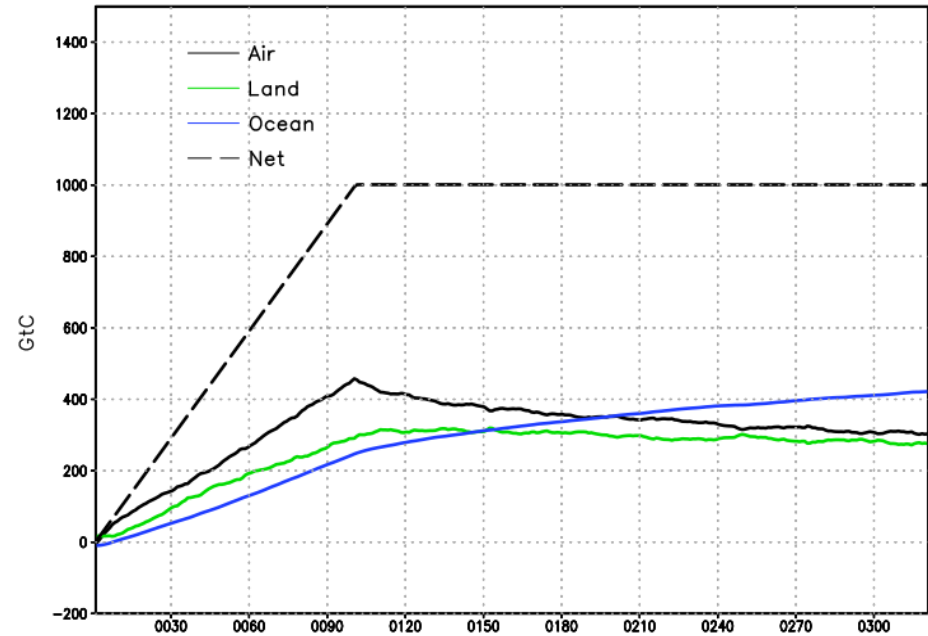
Данные модели ARTS-ESM-L

Временной ход изменения глобальной массы углерода в различных природных резервуарах в экспериментах FLAT10-CDR (a) и FLAT10-ZEC (б)

а) FLAT10-CDR



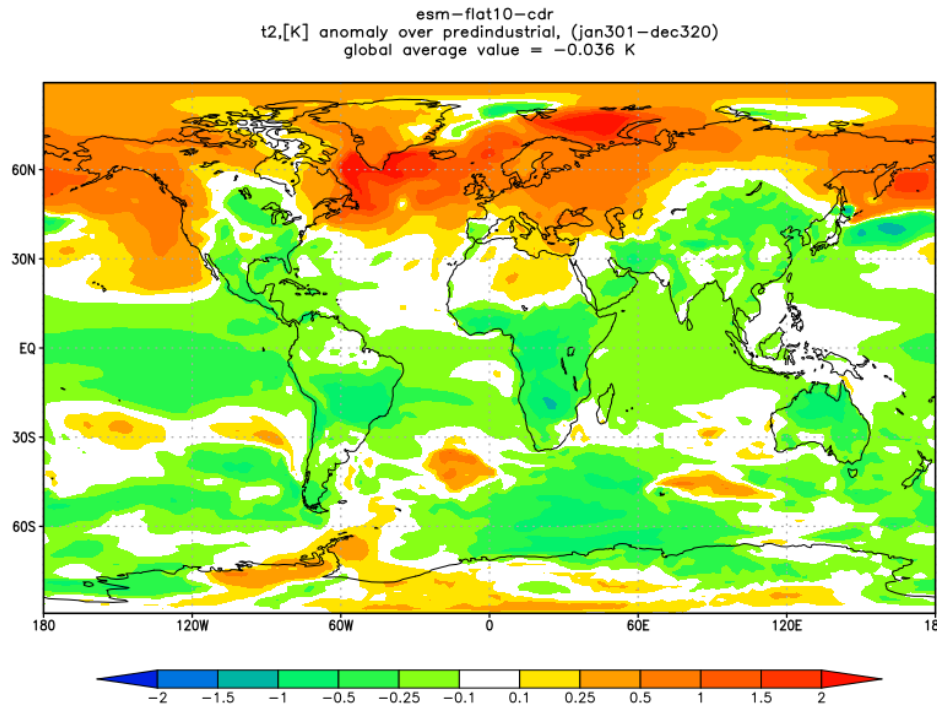
б) FLAT10-ZEC



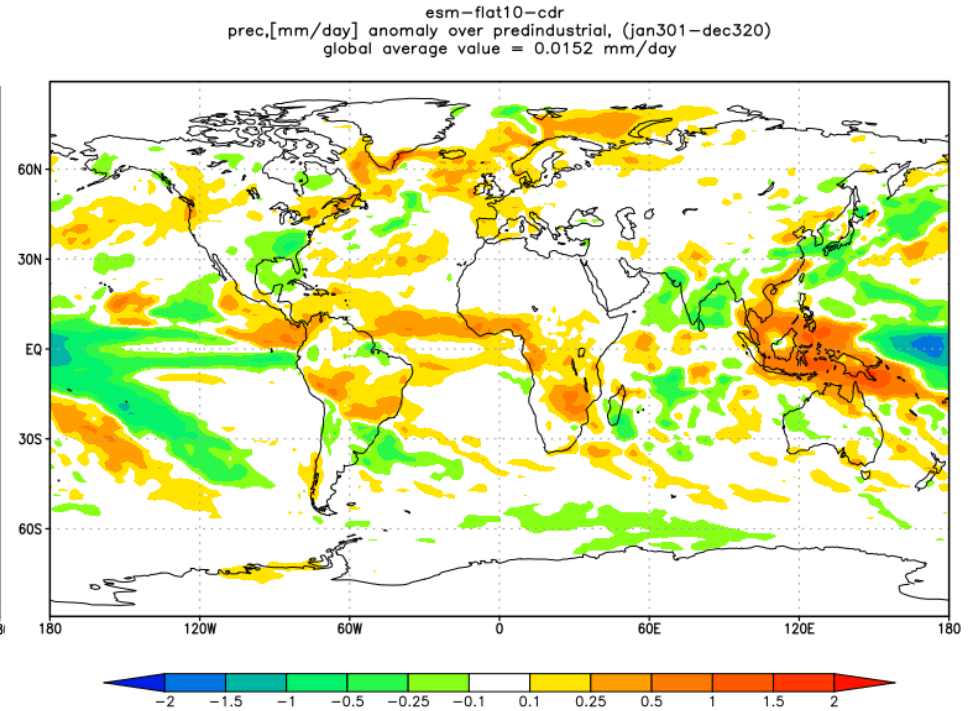
- 1) Момент максимальной концентрации CO₂ в воздухе (океане и суше) опережает (запаздывает) относительно положения максимума кумулятивных выбросов.
- 2) В конце эксперимента углерод из атмосферы и наземной экосистемы переходит в океанический резервуар.

Данные модели ARTS-ESM-L

Аномалия приземной температуры (а) и интенсивности осадков (б) (301-320)
в эксперименте FLAT10-CDR



а) приземная температура

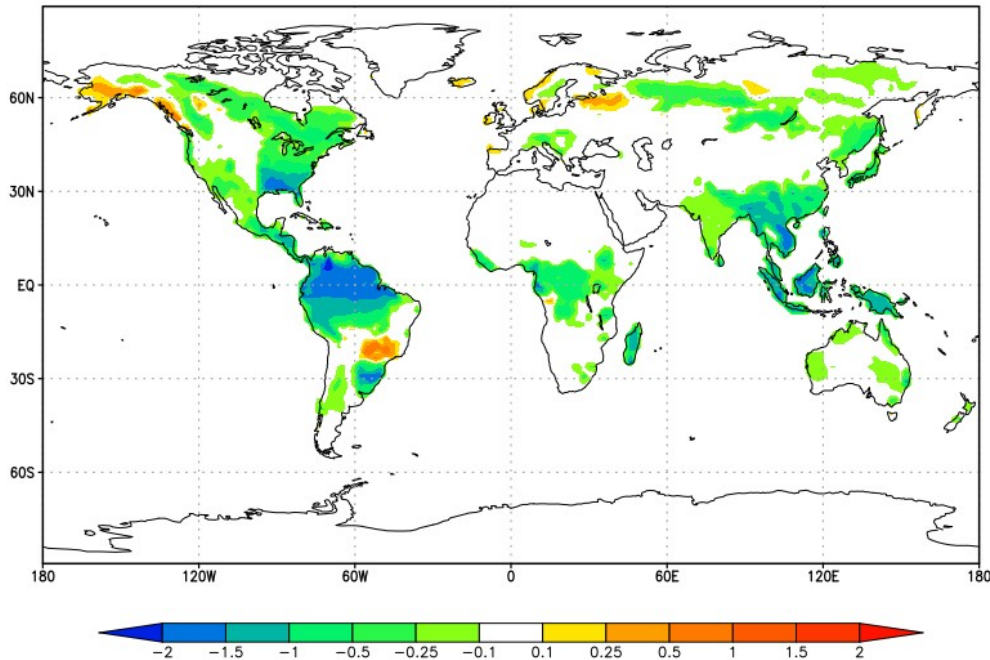


б) интенсивность осадков

Данные модели ARTS-ESM-L

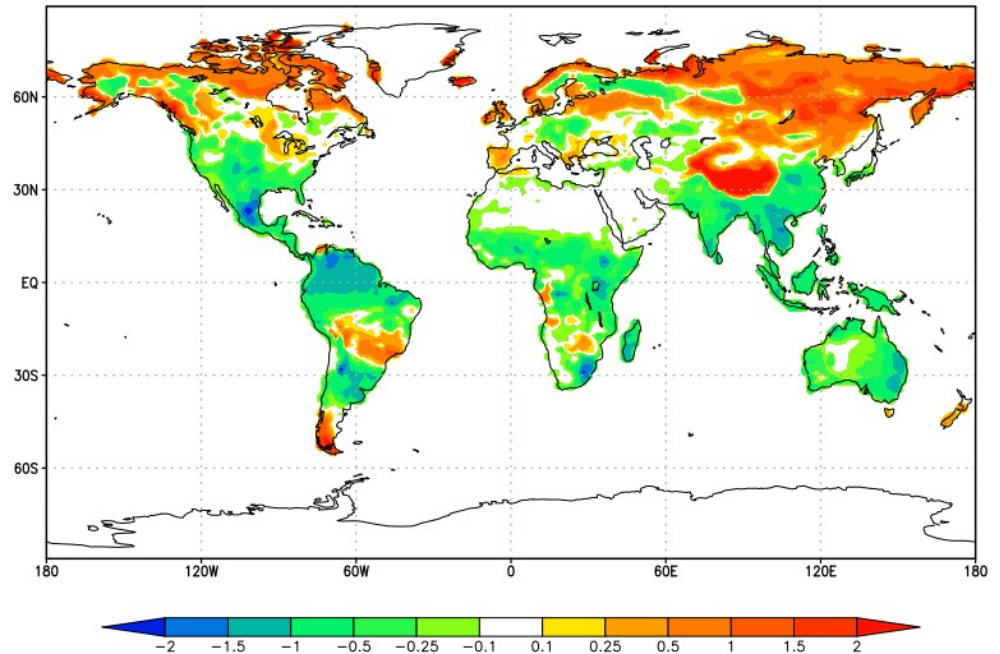
Изменение удельной массы углерода в растительности (а) и почве (б) (301-320) в эксперименте FLAT10-CDR

esm-flat10-cdr
co2veg,[kg/m²] anomaly over preindustrial, (jan301-dec320)
global average value = -0.072 kg/m²



а) растительность

esm-flat10-cdr
co2land,[kg/m²] anomaly over preindustrial, (jan301-dec320)
global average value = -0.018 kg/m²

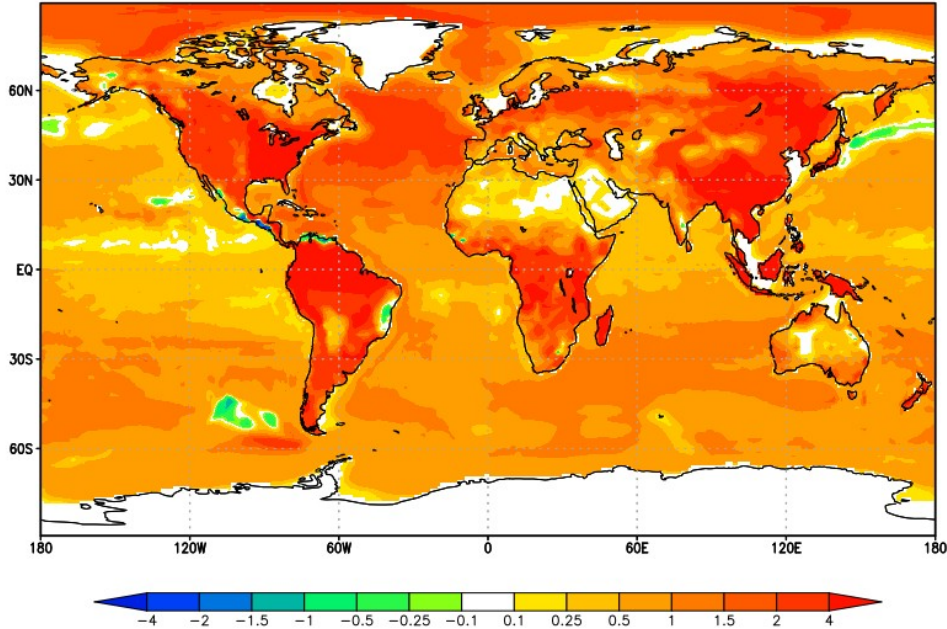


б) почва

Данные модели ARTS-ESM-L

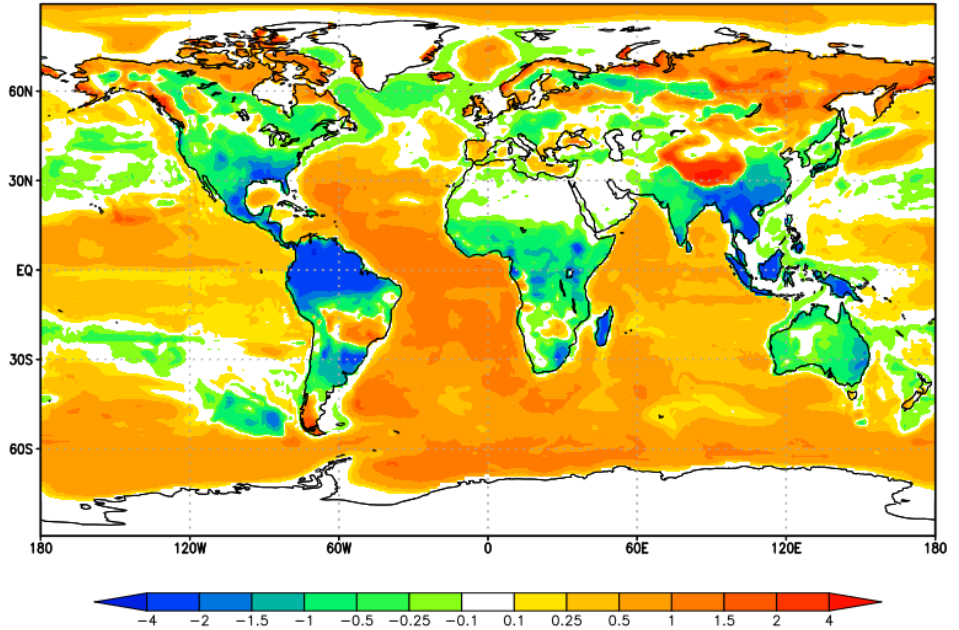
Изменение удельной массы углерода в океане и на суше -
среднее за 101-120(a), 301-320(б) в эксперименте FLAT10-CDR

esm-flat10-cdr
co2landtot+co2ocean.2,[kg/m²] anomaly over pre-industrial, (jan101-dec120)
global average value = 1.3753 kg/m²



a) 101-120

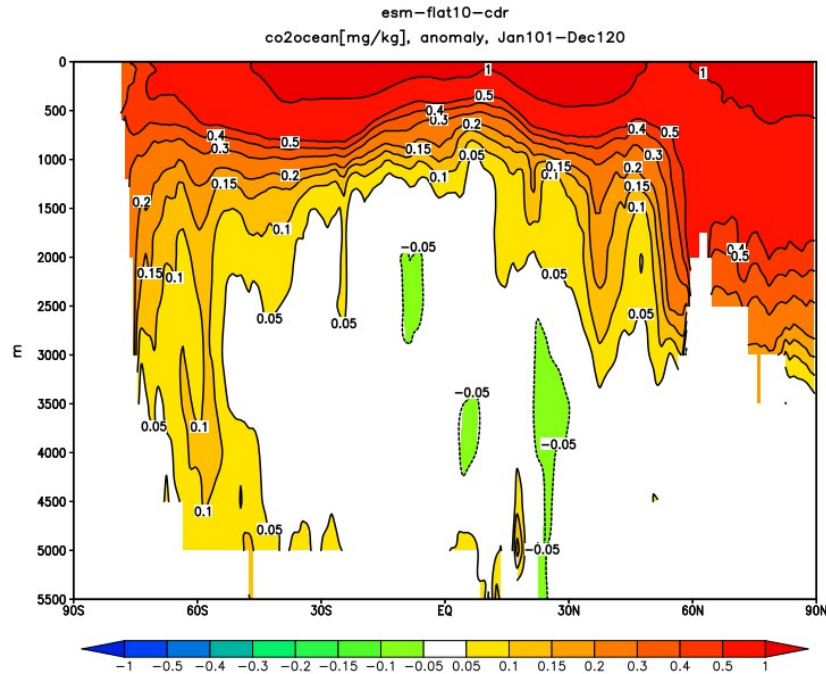
esm-flat10-cdr
co2landtot+co2ocean.2,[kg/m²] anomaly over pre-industrial, (jan301-dec320)
global average value = 0.2768 kg/m²



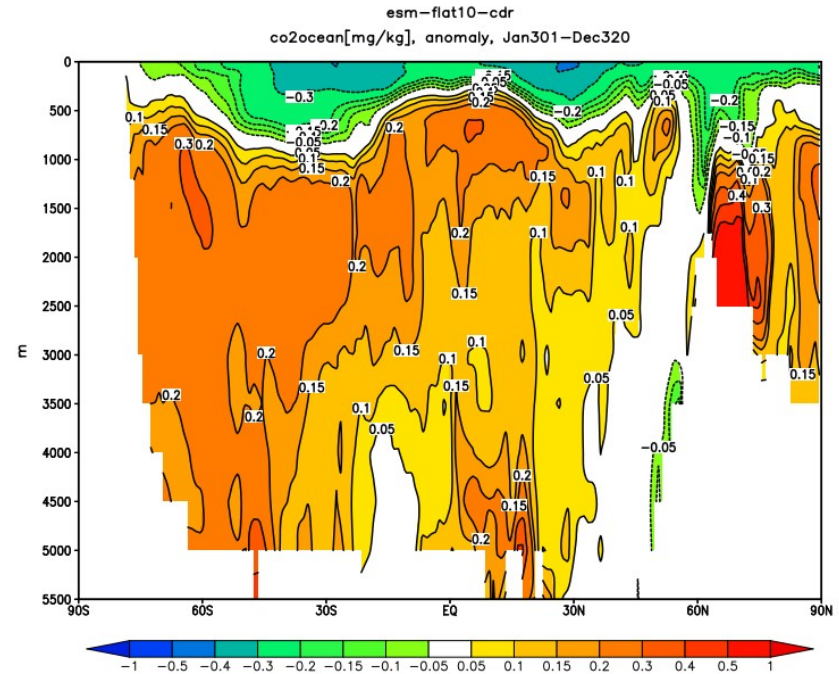
б) 301-320

Данные модели ARTS-ESM-L

Аномалия среднезональной удельной массы растворенного неорганического углерода в океане(мг/кг) - среднее за 101-120 (а), 301-320 (б)
в эксперименте FLAT10-CDR



а) 101-120



б) 301-320

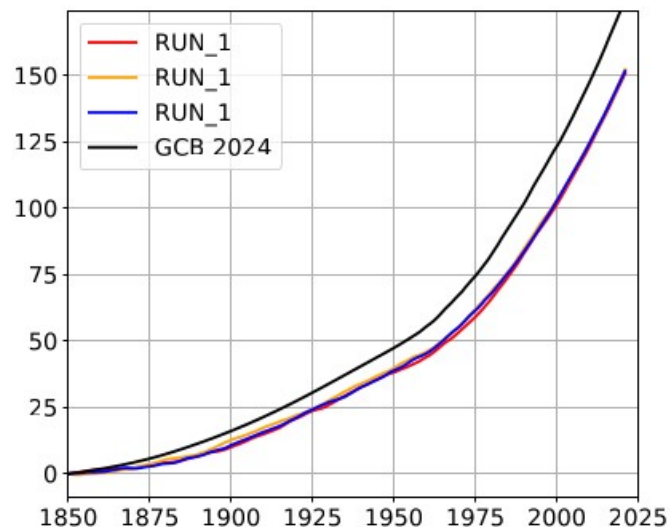
Выводы

- 1) TCRE и метрики асимметрии глобальной температуры, полученные по данным ARTS-ESM-L находятся в диапазоне межмодельного разброса других МЗС из CMIP6.
- 2) Хотя в конце эксперимента FLAT10-CDR глобальная температура возвращается к преиндустриальным значениям, региональные аномалии температуры в средних широтах северного полушария могут достигать $+1.5-2^{\circ}\text{C}$.
- 3) В конце эксперимента глобальная интенсивность осадков чуть превышает преиндустриальные значения. При этом в тропической зоне Тихого океана возникает дипольная аномалия осадков.
- 4) К концу эксперимента углерод в наземной экосистеме накапливается неравномерно. С максимумом в средних широтах северного полушария и Тибете. В океане углерод накапливается в основном в слоях глубже 0.5-1 км.

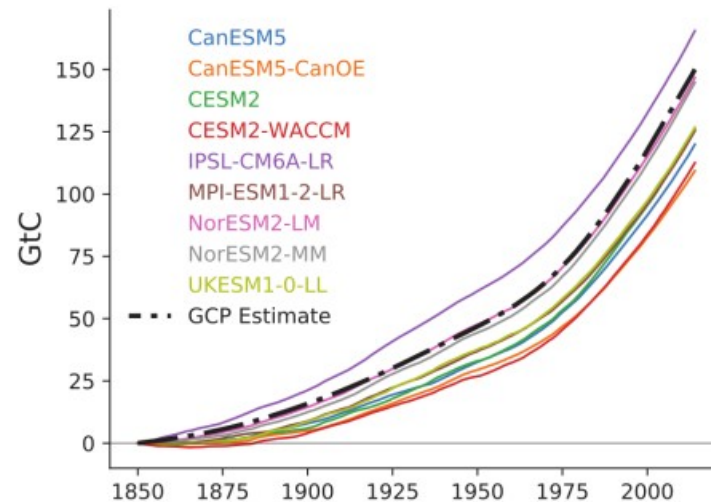
Спасибо за внимание!

Углеродный цикл в океане

Изменение запасов углерода в Мировом океане (Гт С):



ARTS-ESM-L vs GCB 2024
(RMSE = 12 Гт , $R_{corr} = 0.99$)

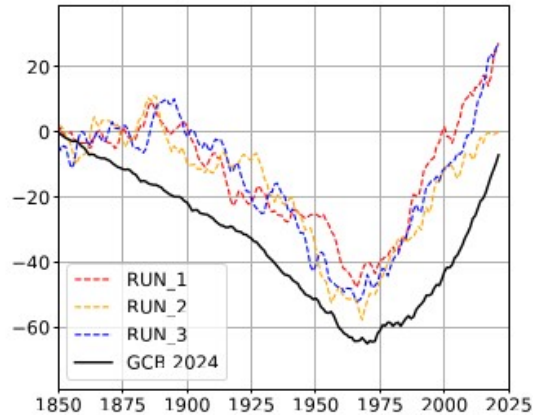


Ансамбль моделей CMIP6
и данные Global Carbon Project
(Рис. 5.23а из 6-ой ОЦ МГЭИК)

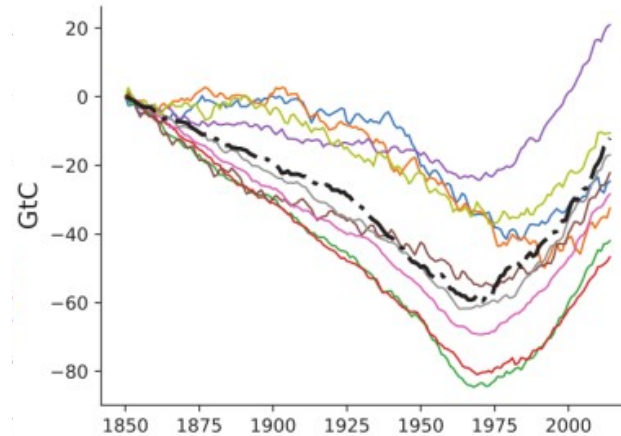
(*) Global Carbon Budget 2024⁷ – обновляемые ежегодно оценки потоков углерода в экосистемах Земли (входит в Global Carbon Project).

Углеродный цикл в наземных экосистемах

Изменение запасов углерода в наземных экосистемах (Гт С):



ARTS-ESM-L vs GCB 2024
(RMSE = 21 Гт , $R_{\text{corr}} = 0.88$)



Ансамбль моделей CMIP6
и данные Global Carbon Project
(Рис. 5.23b из 6-ой ОЦ МГЭИК)

Глобальный углеродный цикл в модели ART-ESM-L

Атмосферная компонента

$$\frac{\partial C_{atm}}{\partial t} = -F_{FSN} + F_{PLR} + F_{SOIL} + F_{SOIL}^{fast} - F_{ATM} + F_{anthro}$$

C_{atm} - масса углерода в воздухе,

F_{FSN} - интенсивность фотосинтеза растений,

F_{PLR} - интенсивность дыхания растений,

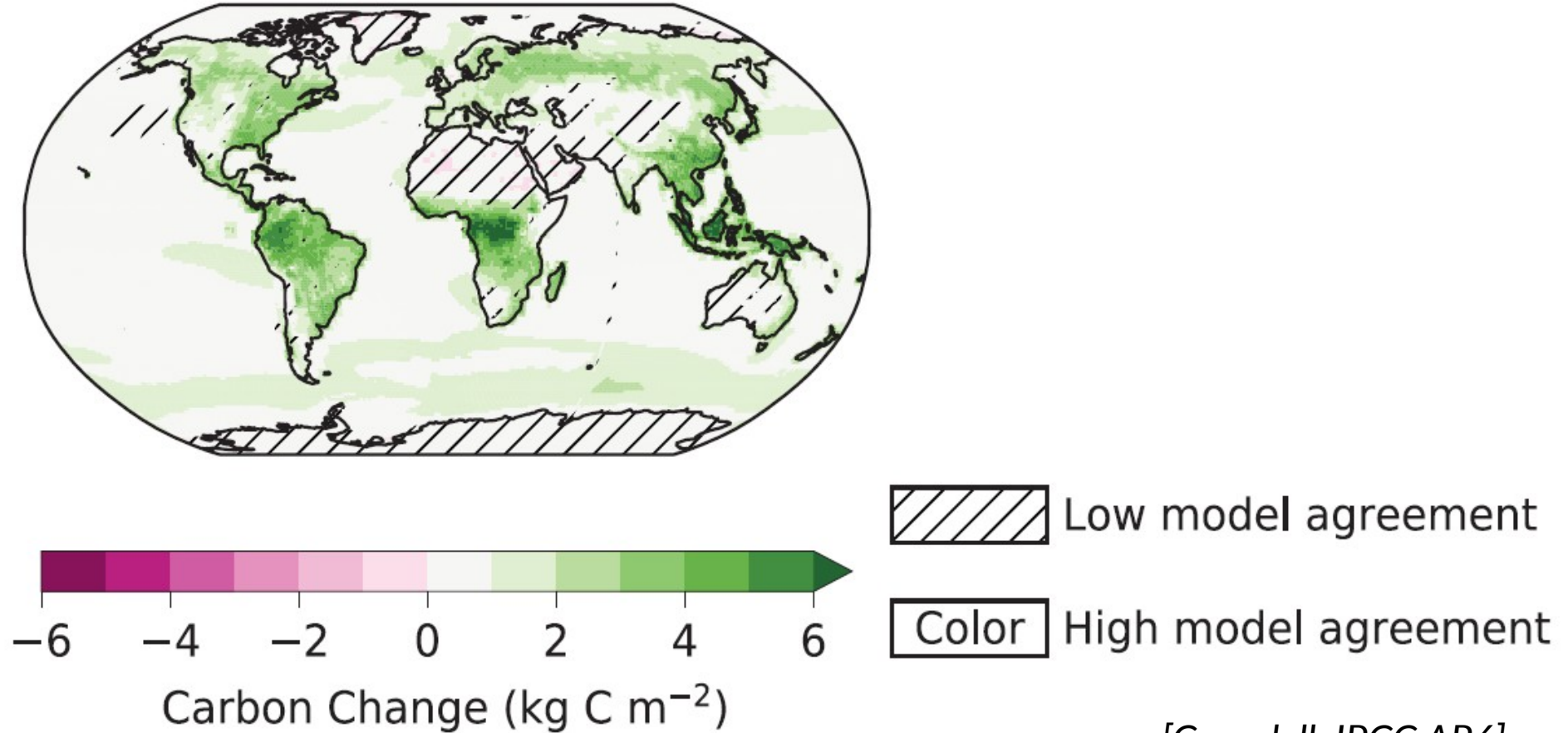
F_{SOIL} , F_{SOIL}^{fast} - интенсивность дыхания почвенных резервуаров (быстрого и антропогенного),

F_{ATM} - поток углерода из атмосферы в океан,

F_{anthro} - антропогенные выбросы

*Более подробное описание углеродного цикла представлено в работе
[Черненко и др., 2025]*

(c) Carbon Change at 2x CO₂ in 1%/yr scenario



[Canadell, IPCC AR6]