



Диагностика и моделирование климатические изменения разных эпох и вклада различных процессов в эти изменения

Лаборатория теории климата:

**Елисеев А.В., Акперов М.Г., Аржанов М.М.,
Денисов С.Н., Чернокульский А.В., Мурышев К.Е.,
Парфенова М.Р., Бабанов Б.А., Бугримов А.В.,
Нарижная А.И., Плосков А.Н., Тимажев А.В.,
Блинов П.Д., Ныров А.О.**

**Конференция "Физика атмосферы и климата",
посвященная 70–летию ИФА им. А.М. Обухова РАН**

О Лаборатории теории климата

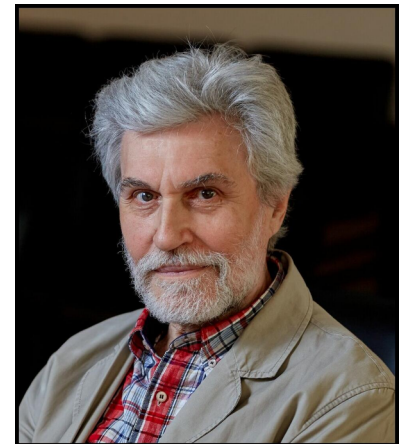
Лаборатория была организована в 1975 г. в рамках Теоретического отдела как Лаборатория энергетики планетных атмосфер (ЛЭПА) под руководством Г.С. Голицына. В 1981 г. лаборатория переименована в Лабораторию теории климата (ЛТК). В 1997 г. руководителем Лаборатории стал И.И. Мохов. С 2002 года ЛТК входит в состав Отдела исследования климатических процессов (ОИКП).

Направления деятельности:

- Исследования в области теории климата.
- Диагностика и моделирование глобальных и региональных климатических процессов и изменений.
- Исследования климатической предсказуемости.
- Оценки последствий климатических изменений.
- Исследования, связанные с задачами адаптации к изменениям климата и его регулирования.

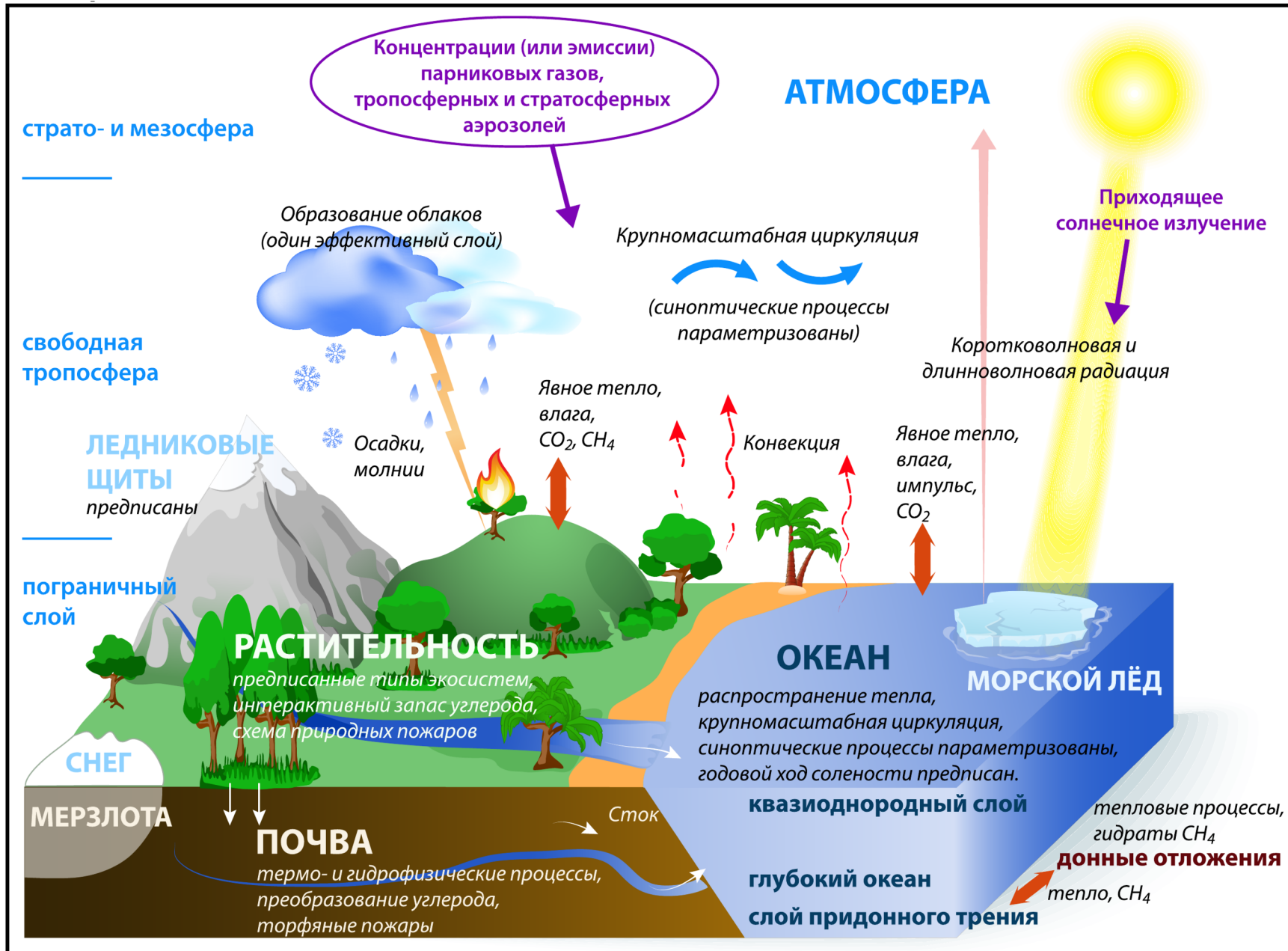


акад. РАН Г.С. Голицын



акад. РАН И.И. Мохов

МЗС ИФА РАН: общая структура



В.К. Петухов

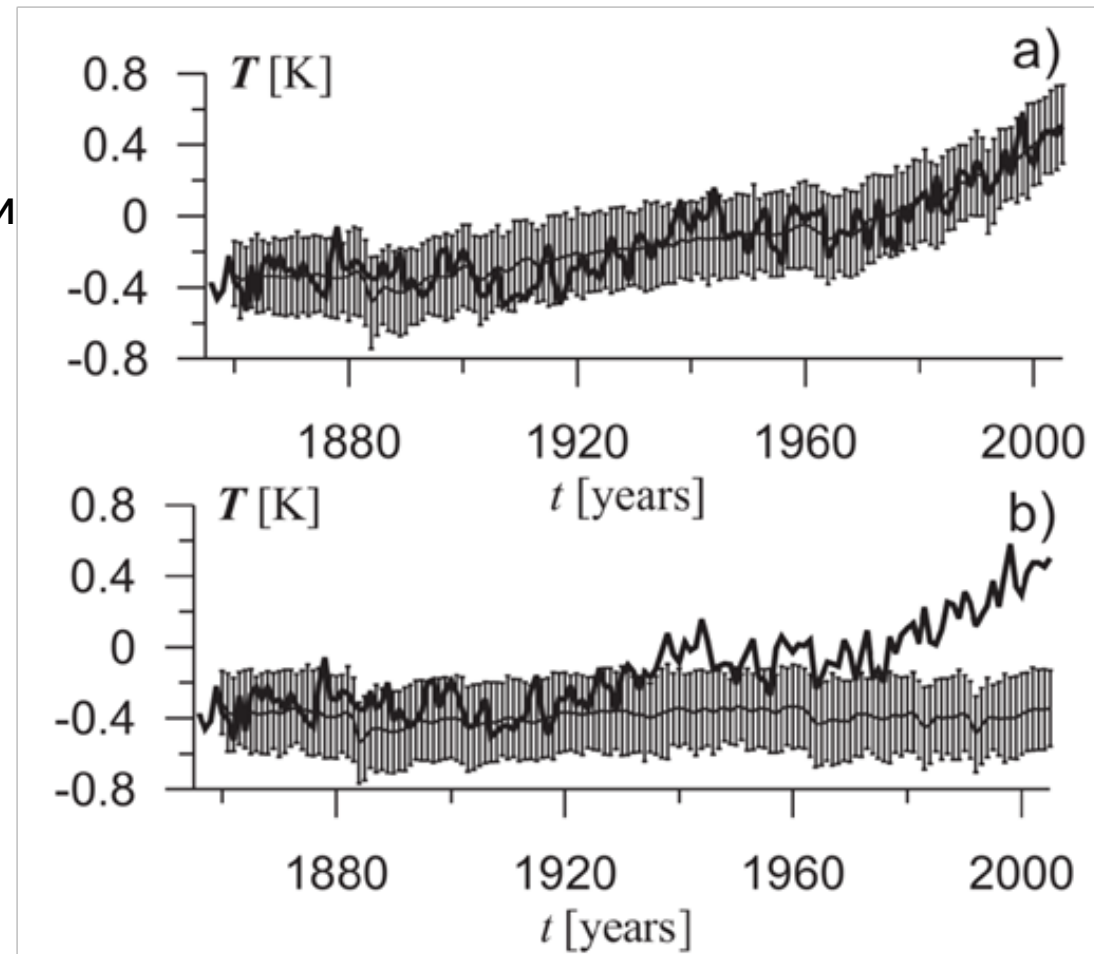
Горизонтальное разрешение: $4.5^\circ \times 6^\circ$

Скорость вычислений: ~ 10 с на модельный год (1 процессор)

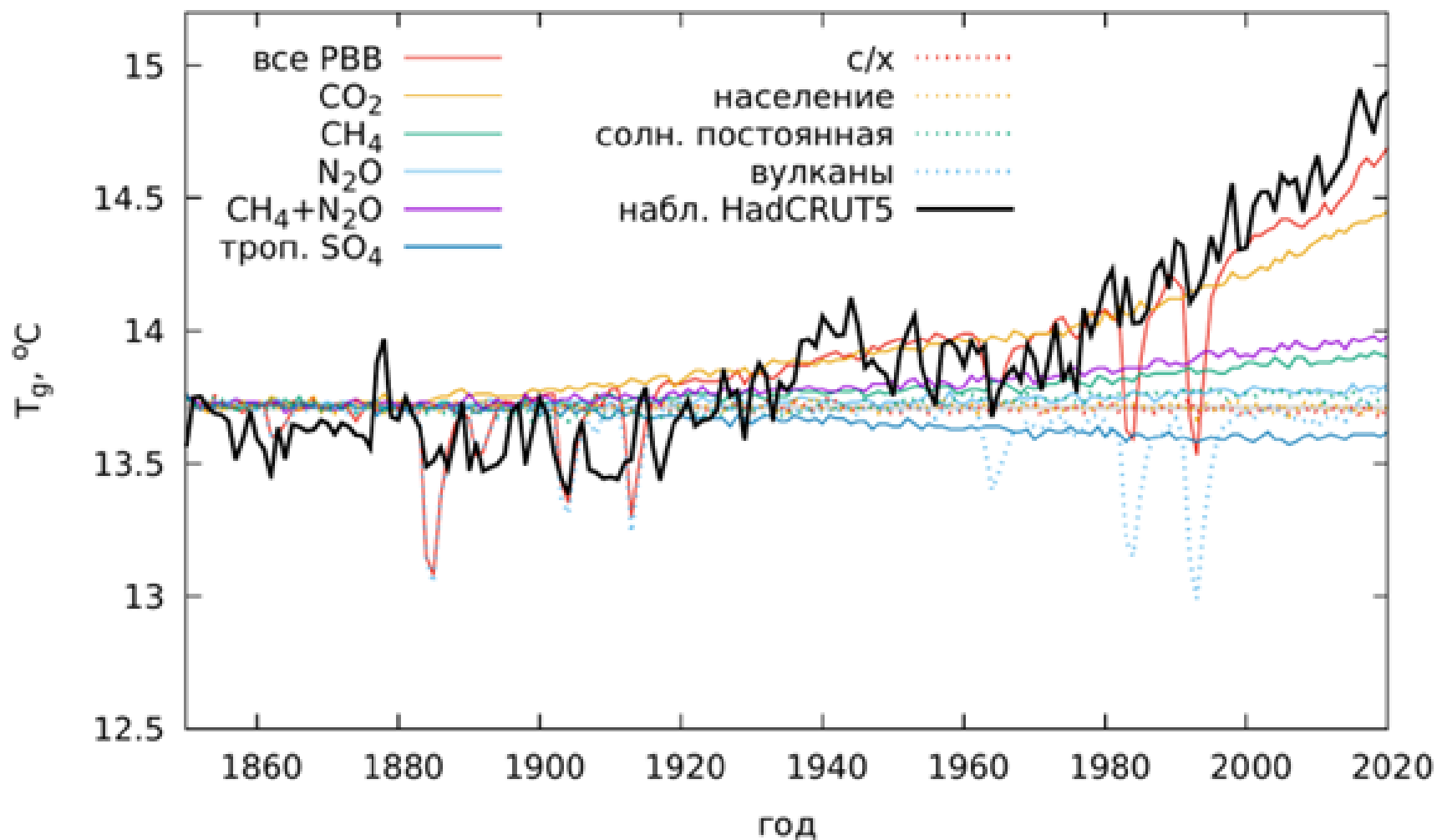
Эмпирический анализ причин современных изменений климата (цикл работ И.И. Мохова и Д.А. Смирнова)

С использованием причинности по Грейнджеру показано, что за последние 150 лет на вариации глобальной температуры влияют колебания содержания углекислого газа в атмосфере, изменения солнечной постоянной и вулканическая активность. Однако долгосрочное повышение глобальной температуры в последние десятилетия может быть объяснены только при учете антропогенного фактора за счет изменения концентрации CO_2 в атмосфере. В дальнейшем эти результаты были обобщены учётом влияния естественной изменчивости климата с сохранением основного вывода.

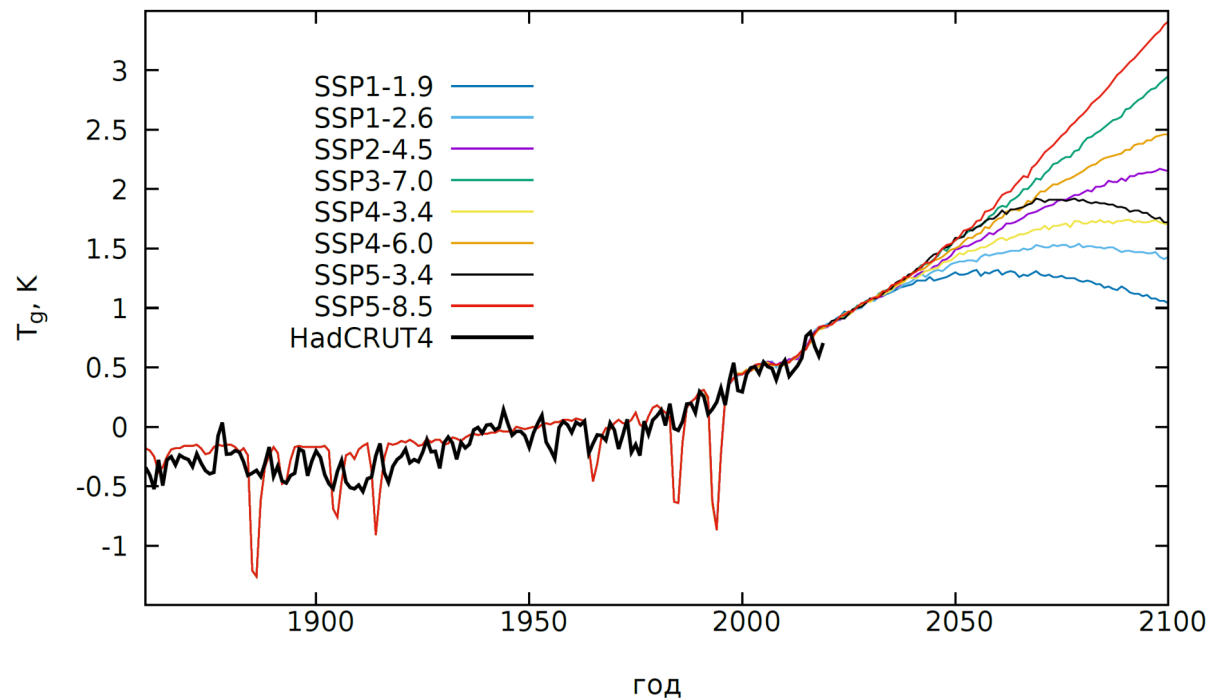
Рис. а) Изменения глобальной температуры в 100 реализациях статистической модели, основанной на причинности по Грейнджеру, при учёте всех перечисленных факторов (закрашенная область) в сравнении с данными HadCRUT3 (черная линия). б) Подобно а), но без учёта влияния изменения концентрации CO_2 в атмосфере
[Smirnov D.A., Mokhov, 2009]



Анализ причин изменений климата. Расчеты с МЗС ИФА РАН [Елисеев и др., 2025]

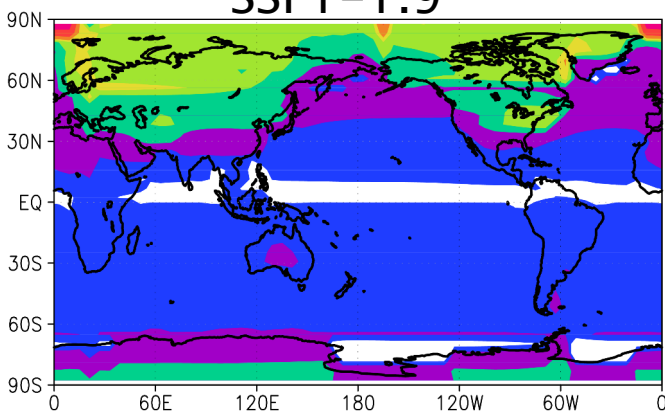


Изменение среднегодовой приземной температуры в XXI веке

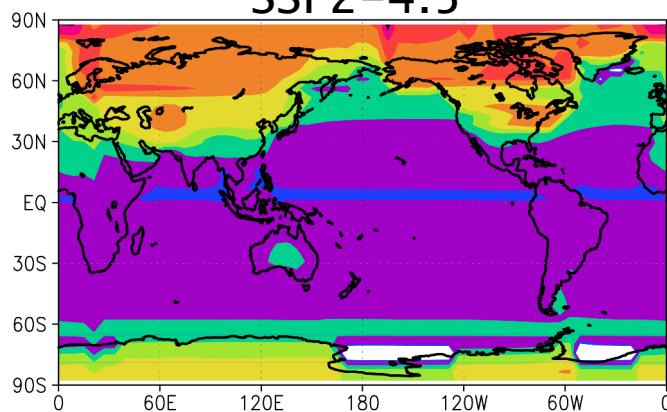


(2090–2100 гг.) – (1961–1980 гг.)

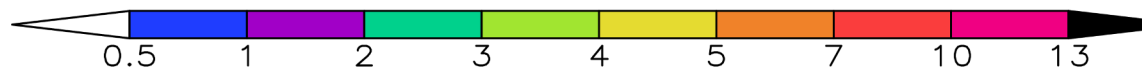
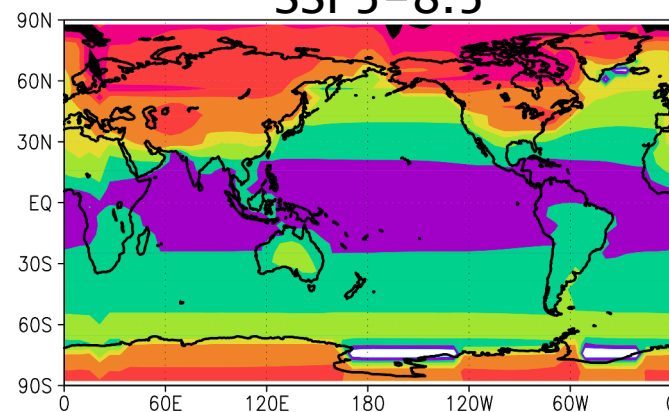
SSP1–1.9



SSP2–4.5

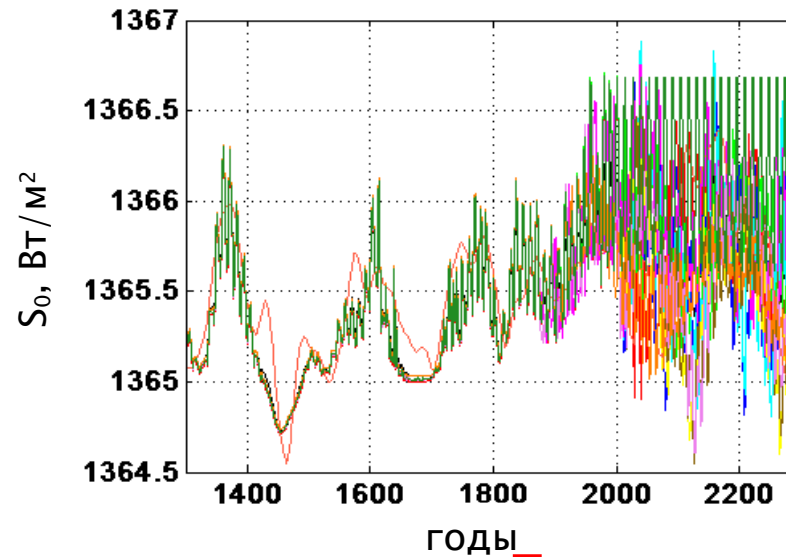


SSP5–8.5



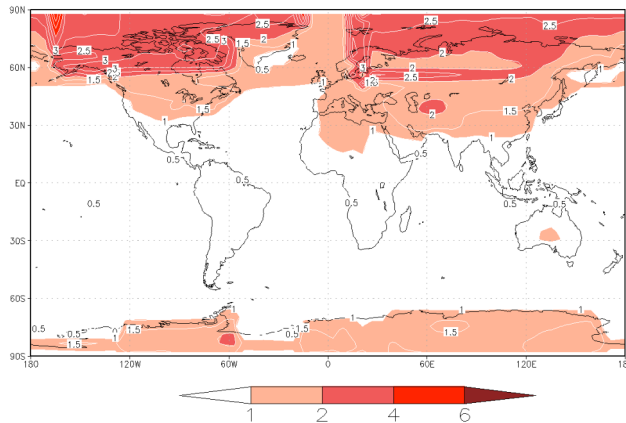
Влияние изменений солнечной постоянной на будущие изменения климата [Мохов и др., 2006; Елисеев и др., 2025]

Экстраполяция S_0 авторегрессионным методом

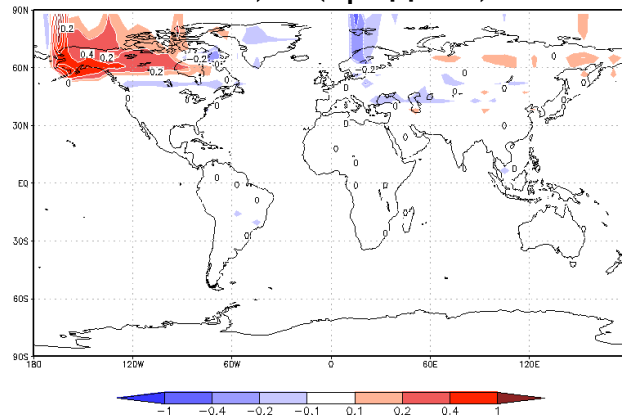


Изменение температуры от 1990–2000 гг. к 2090–2100 гг., RCP 2.6

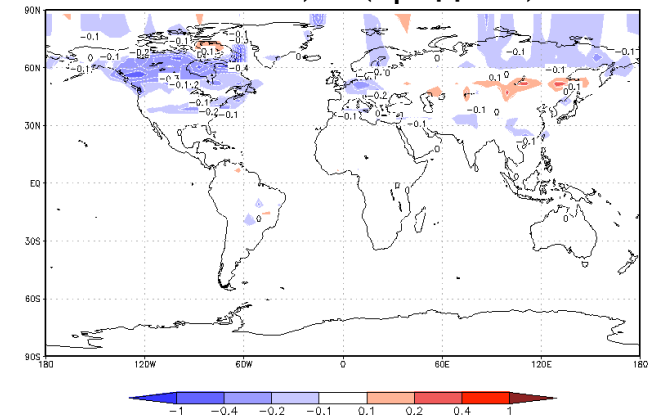
среднее по всем S_0



(макс. положительный
отклик) – (среднее)



(макс. отрицательный
отклик) – (среднее)



Взаимное запаздывание между глобальной температурой и q_{CO_2} (цикл работ К.Е. Мурышева и соавторов)

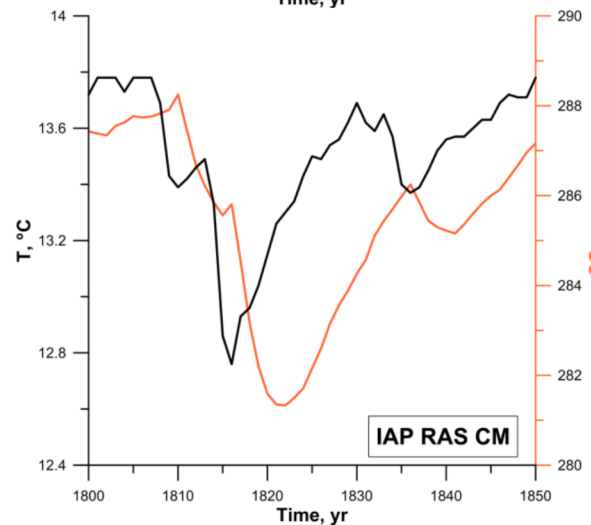
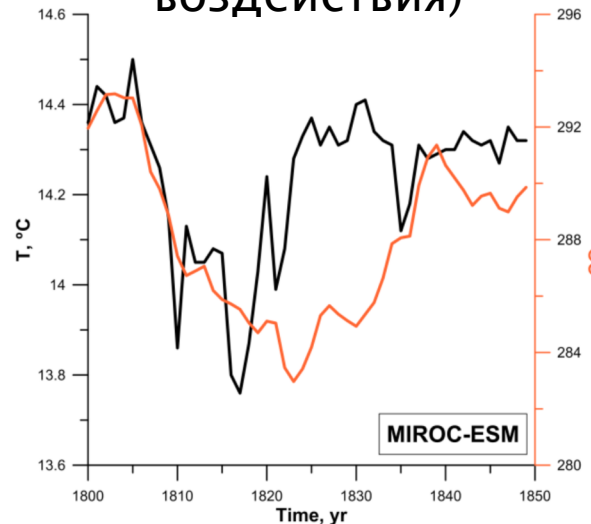
Мотивация:

Температура опережает q_{CO_2} для

- ледниковых циклов плейстоцена (однако без учёта несинхронности изменений между глобальной температурой и температурой Антарктиды) – 10^2 лет;
- последнего тысячелетия – 10^1 лет;
- короткопериодных (но не трендовых) межгодовых изменений в XX веке – ~ 1 год.

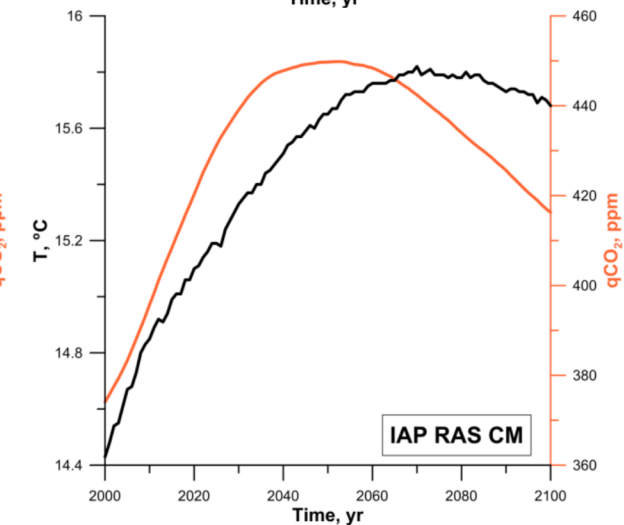
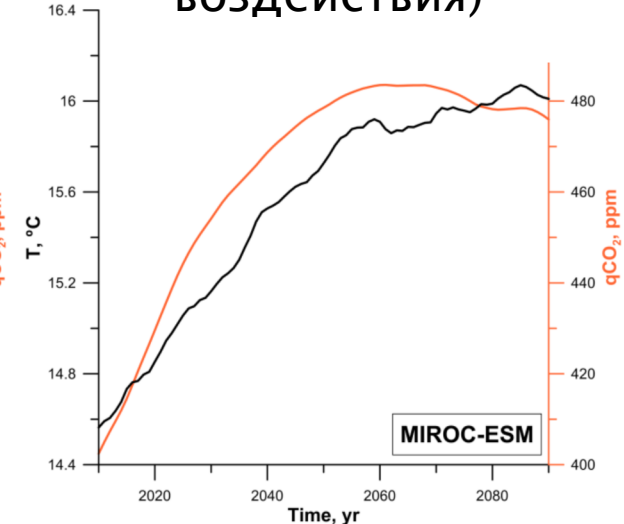
Утверждалось, что модели, связывающие потепление XX века с преимущественно парниковым эффектом, неверны

XIX век:
(естественные
воздействия)



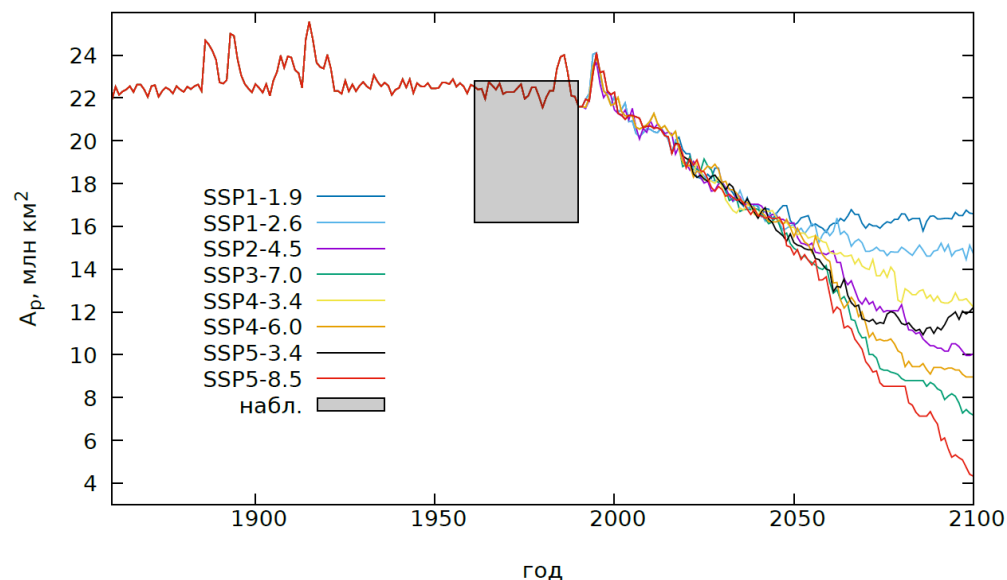
T опережает q_{CO_2}

XXI век:
(антропогенные
воздействия)



q_{CO_2} опережает T

Площадь распространения приповерхностной вечной мерзлоты (цикл работ М.М. Аржанова и соавторов)



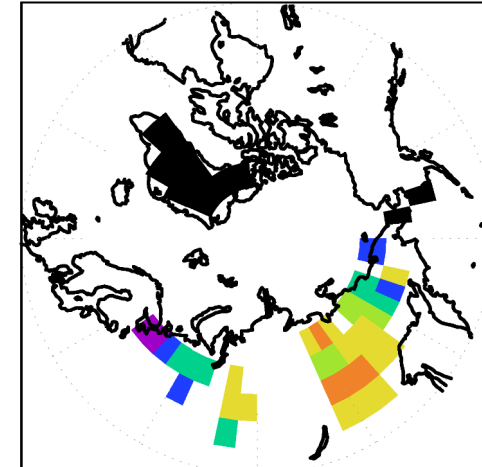
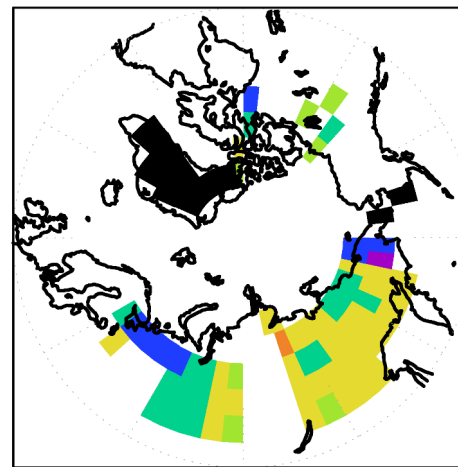
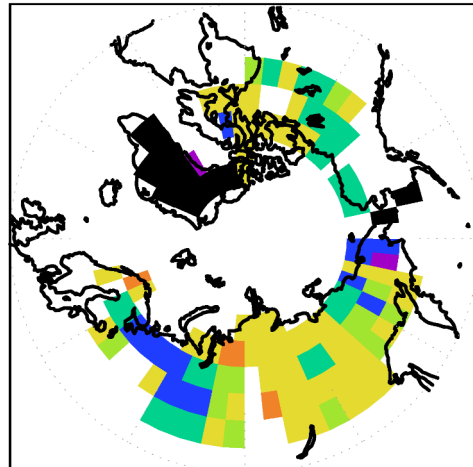
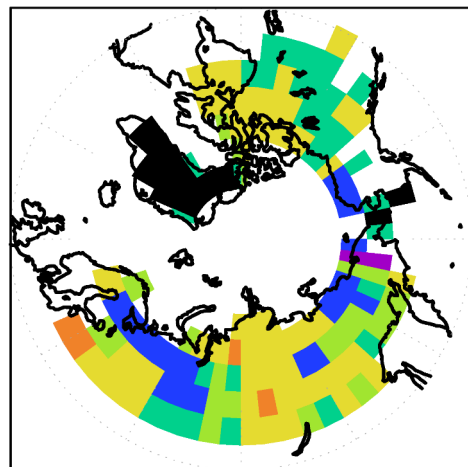
глубина сезонного протаивания

1961–1980 гг.

2090–2100 гг.,
SSP1–1.9

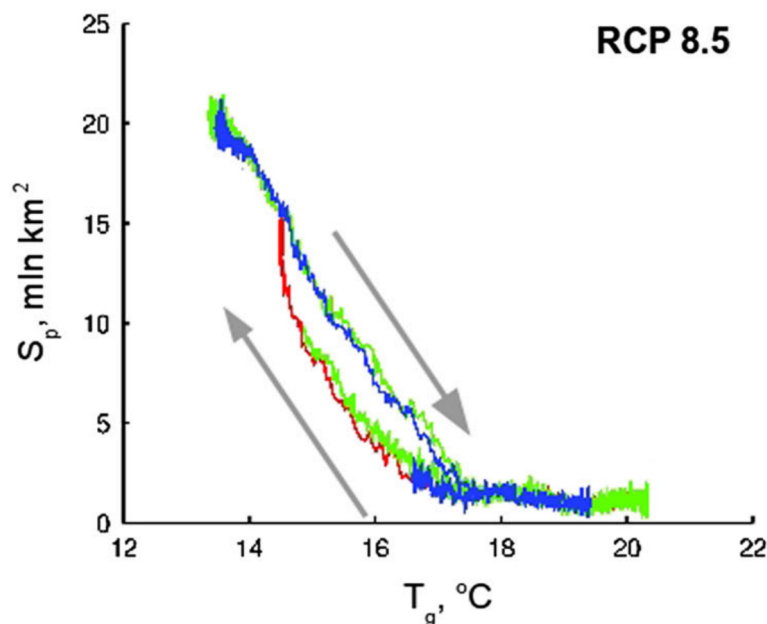
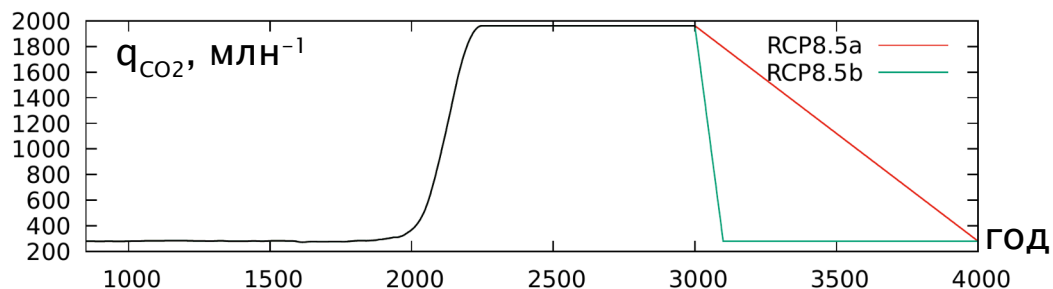
2090–2100 гг.,
SSP2–4.5

2090–2100 гг.,
SSP5–8.5

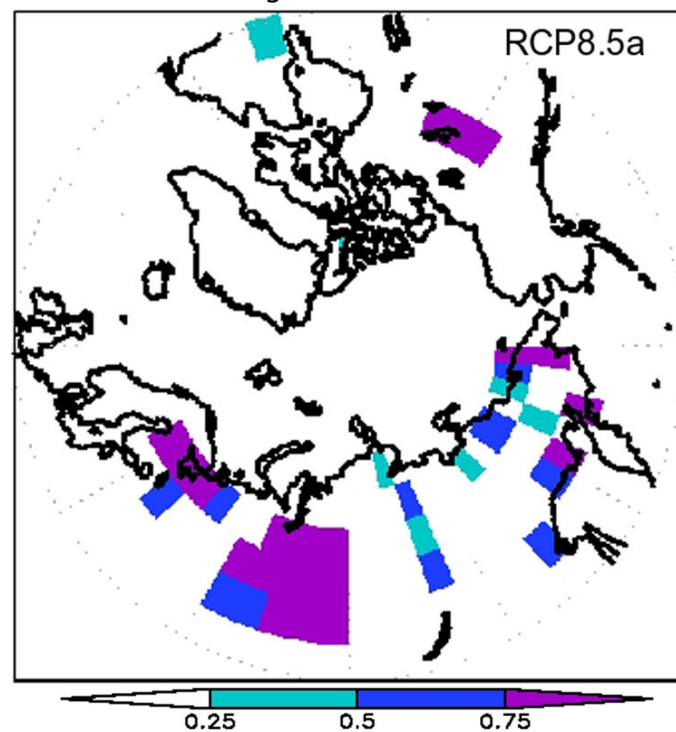


М

Частичная необратимость таяния приповерхностной вечной мерзлоты (цикл работ М.М. Аржанова, А.В. Елисеева, И.И. Мохова, П.Ф. Демченко)



Различие времени существования вечной мерзлоты между ветвями при $15.2^{\circ}\text{C} \leq T_g \leq 15.8^{\circ}\text{C}$



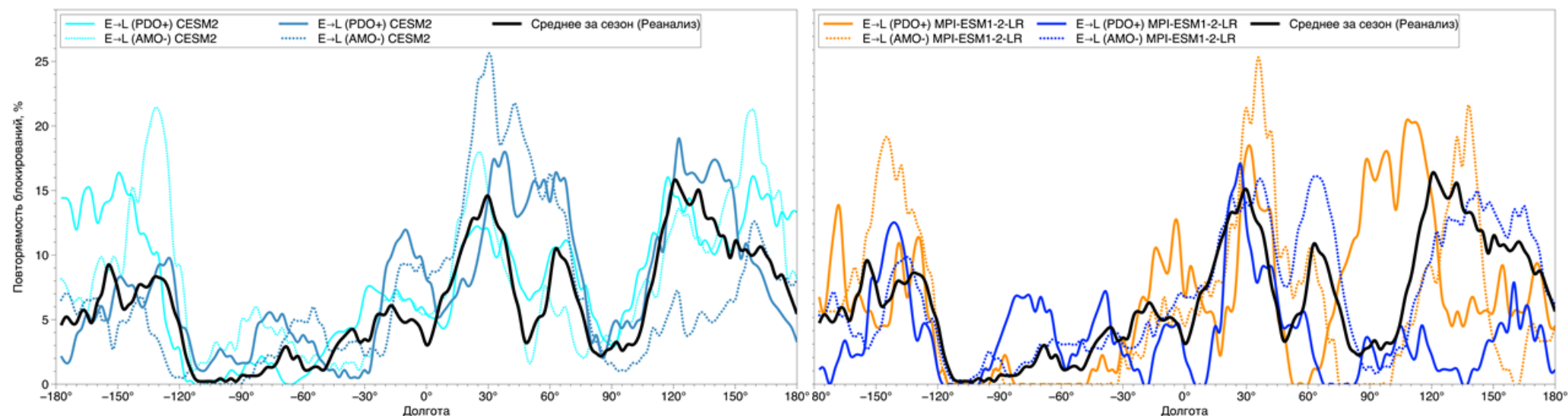
- Различие между ветвями увеличивается с интенсивностью антропогенного воздействия
- Причина – медленное распространение теплового сигнала в торфе (болота)

Исследования вихревой динамики атмосферы (цикл работ И.И. Мохова и соавторов)

Повторяемость летних атмосферных блокирований в 1950–2014 гг. при переходах E→L в фазах PDO+ и AMO–

CESM2

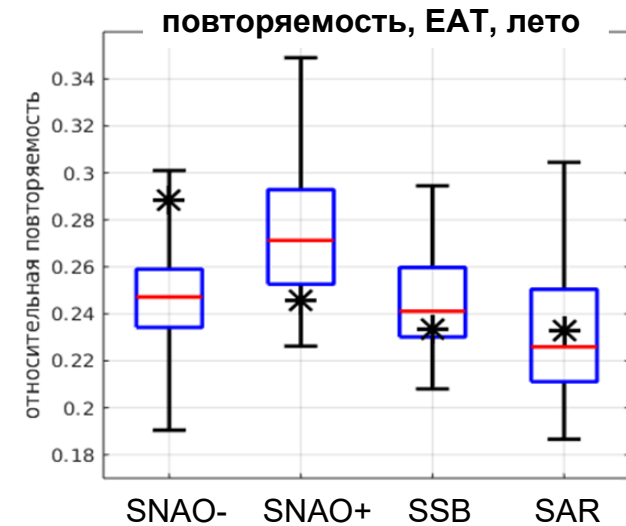
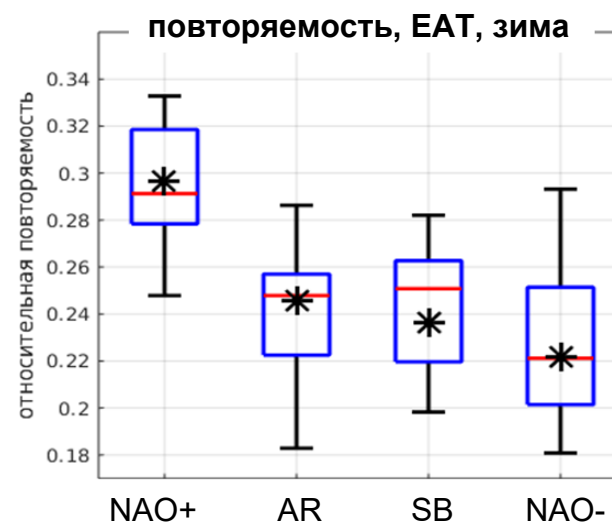
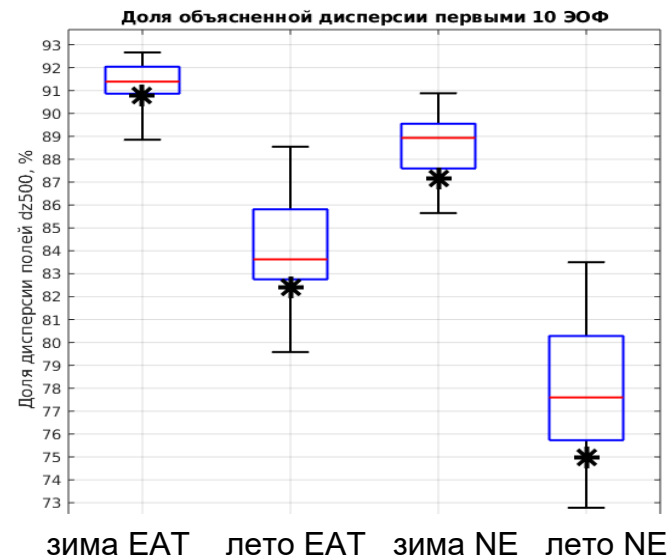
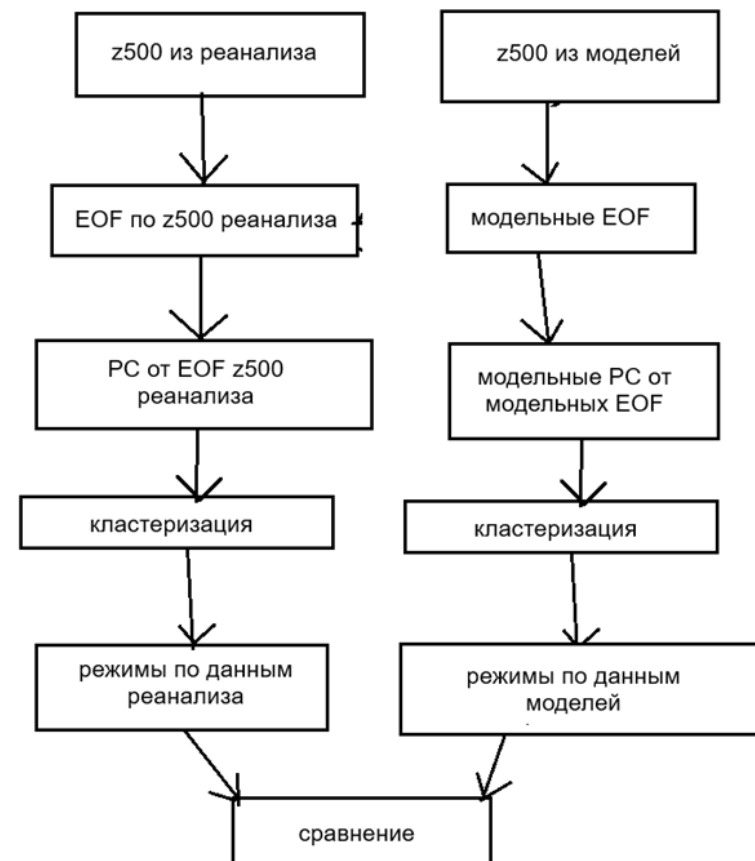
MPI-ESM1-2-LR



- Повторяемость блокирований летом максимальна над восточной Европой для обеих моделей при PDO+ и AMO–.
- Значительные межмодельные различия на востоке Евразии, западе Тихого океана и у западного побережья Европы.

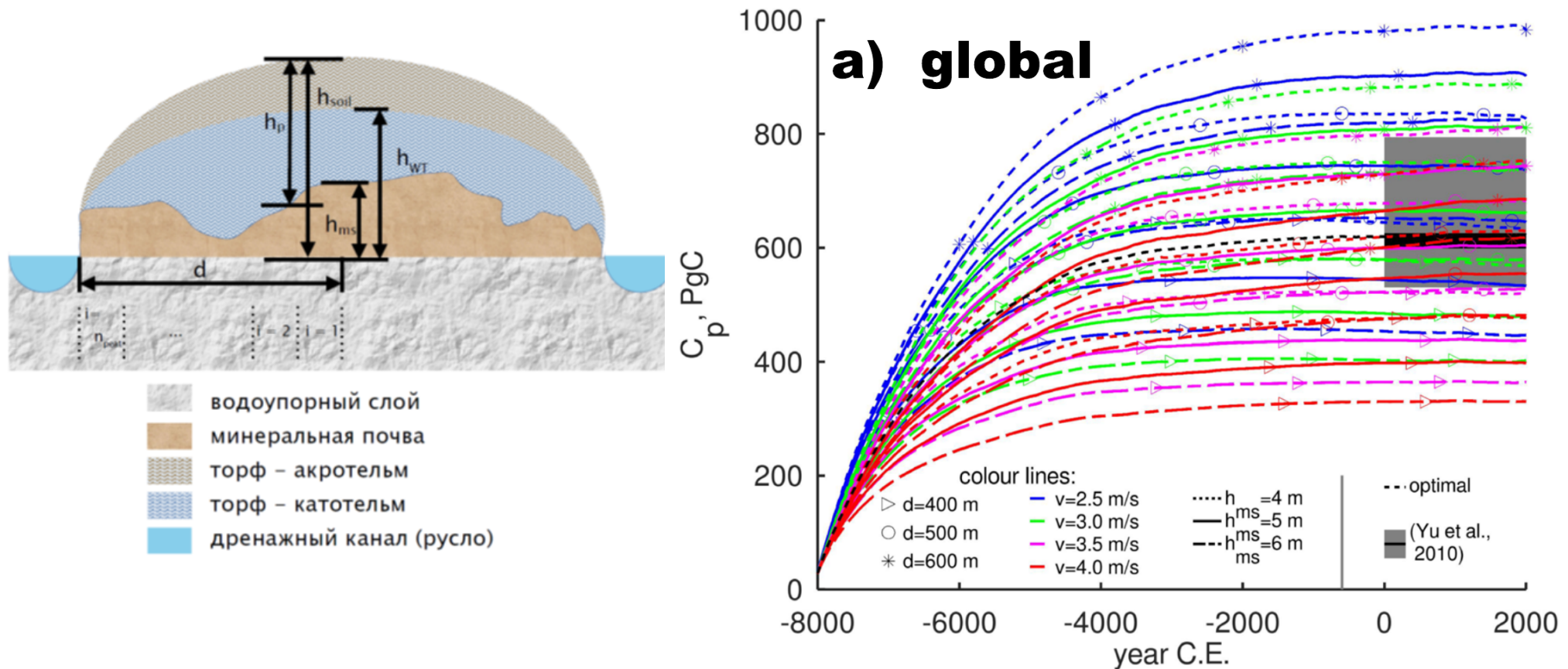
Исследования погодных режимов (цикл работ В.А. Семенова, Б.А. Бабанова и соавторов)

- среднесуточные данные Z500 (ERA5 и 23 модели CMIP6), 1950–2014 гг.
- выделение Евро-Атлантики (EAT: 80°з.д–40°в.д) и Северной Евразии (NE: 0–180°в.д.)
- ЭОФ-разложение, исключение годового хода и фильтрация по времени ($T > 10$ сут.)
- кластеризация методом k-means



Взаимодействие климата и биогеохимических циклов (цикл работ А.В. Елисеева, С.Н. Денисова и соавторов)

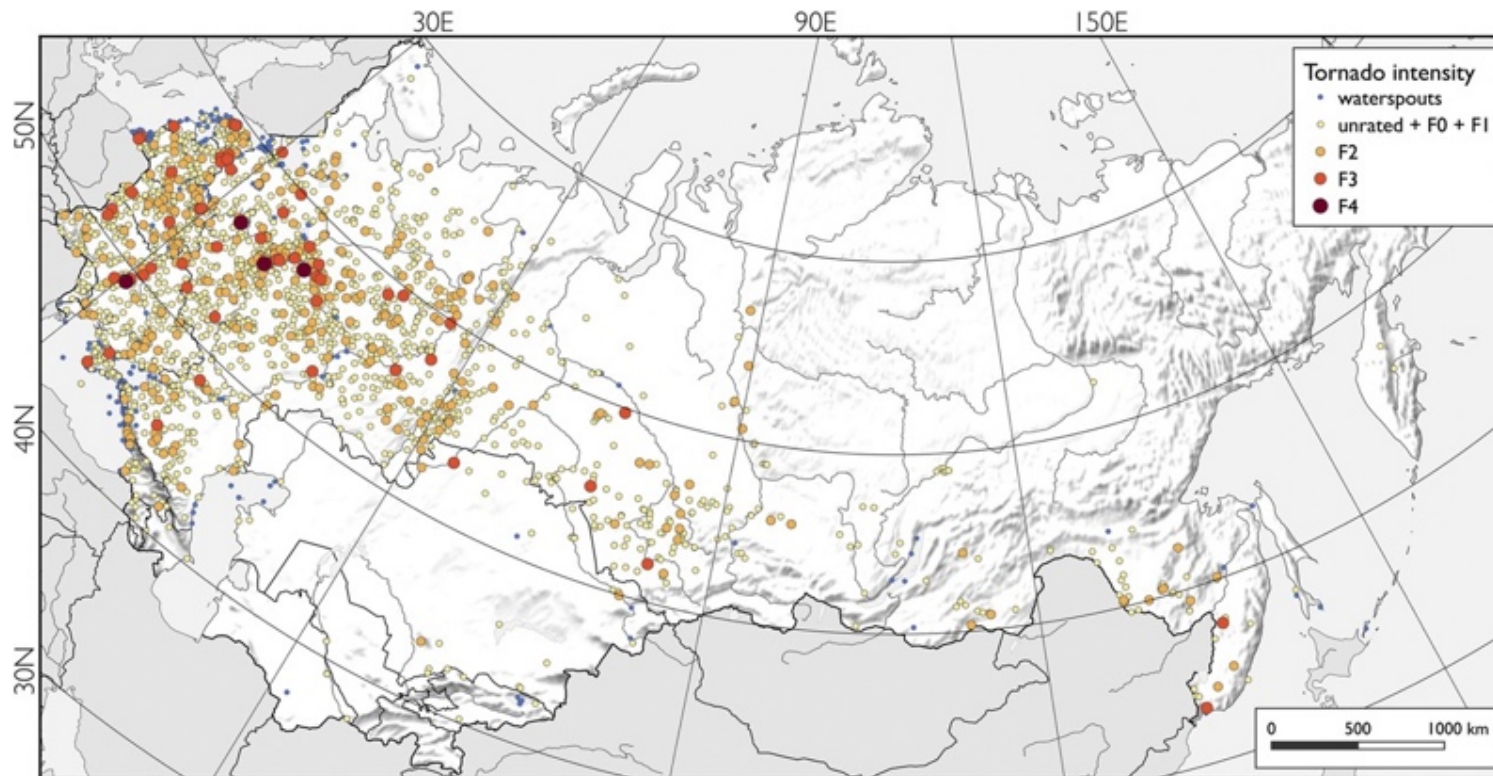
Воспроизведение голоцена с МЗС ИФА РАН + модель задержанного дренажа для накопления торфа в болотах



Анализ характеристик опасных природных явлений. Базы данных для ОПЯ (цикл работ А.В. Чернокульского и соавторов)

Созданы уникальные базы данных по

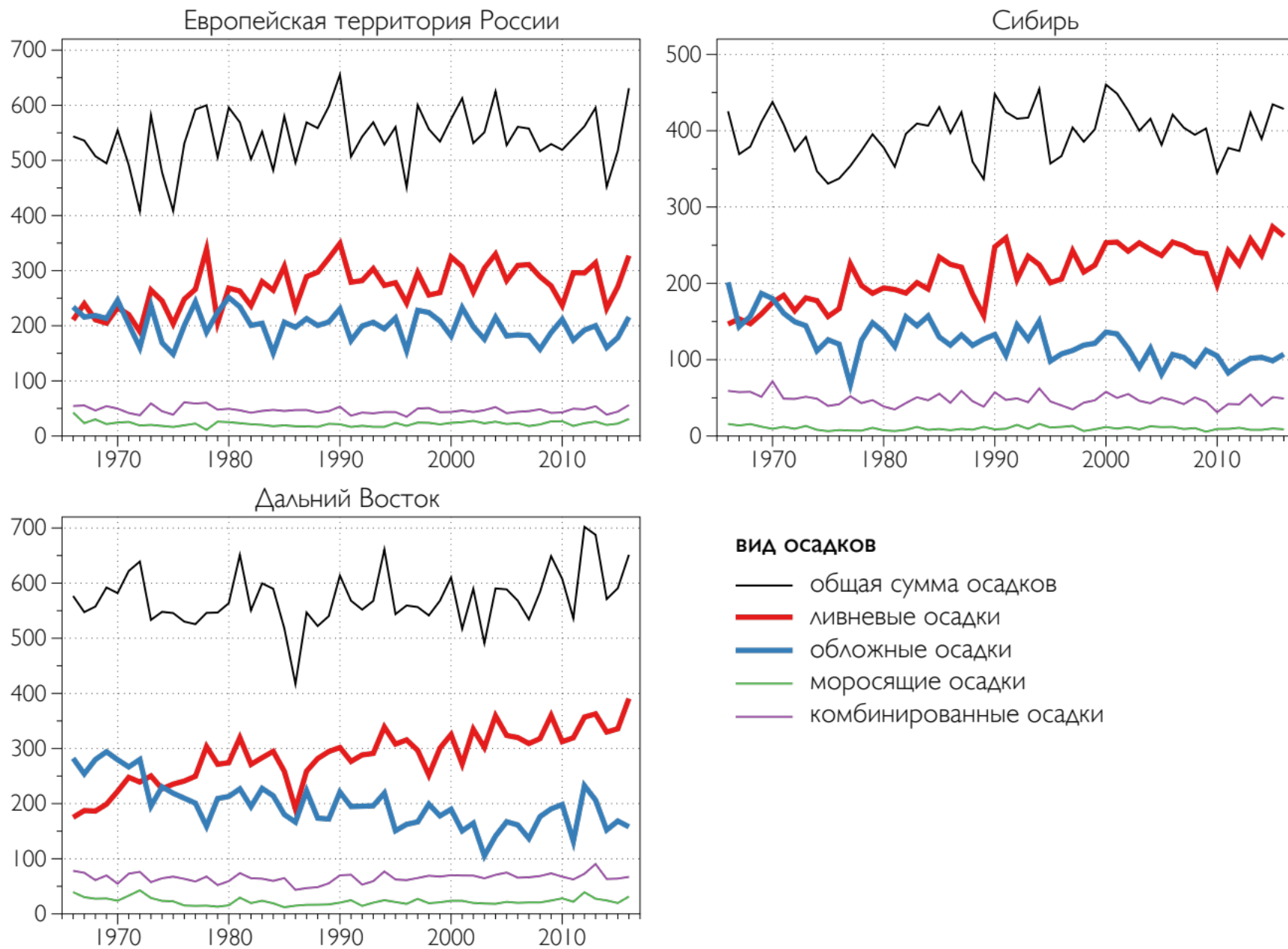
- смерчам (северная Евразия),
- сильным ливням (Россия),
- крупному граду (Россия),
- шквалам (лесная зона России),
- ветровалам (лесная зона России),
- индексам конвективной неустойчивости (северная Евразия),
- осесимметричным и линейным МКС.



[Chernokulsky
et al., 2020]

Анализ характеристик опасных природных явлений.

Годовые суммы осадков разного вида по данным станционных наблюдений [Chernokulsky et al., 2019].



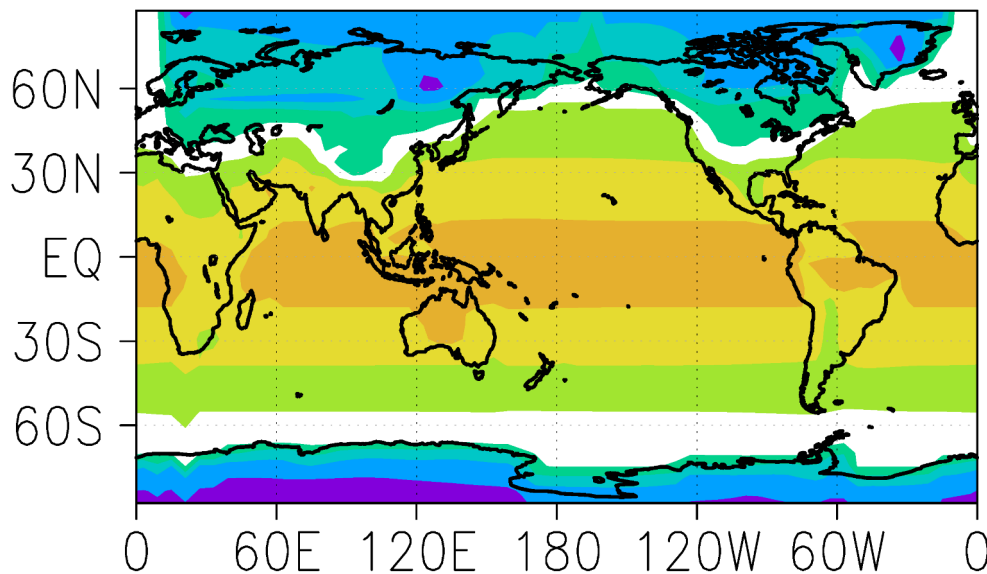
Выводы

Тематика исследований ЛТК охватывает:

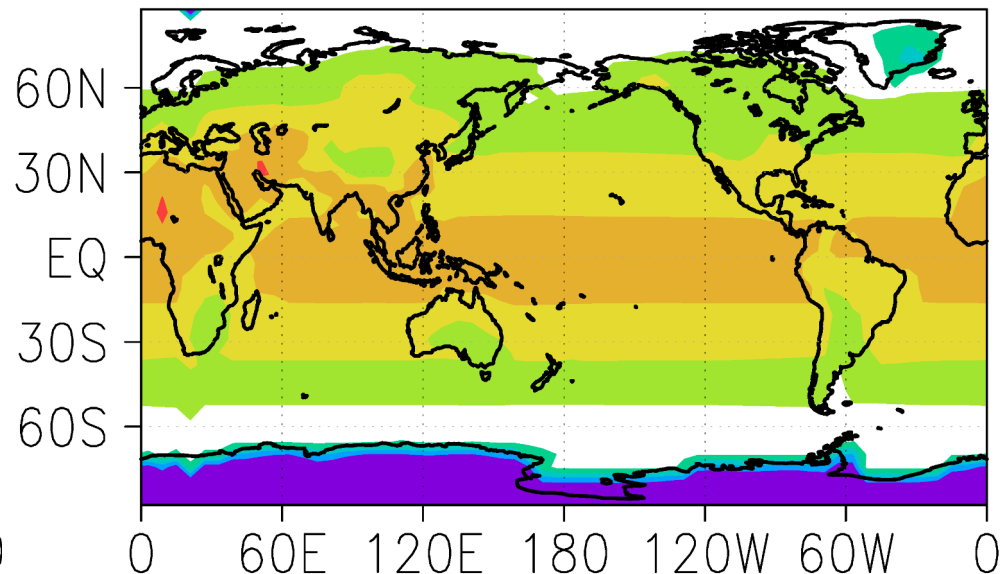
- Диагностику и моделирование глобальных и региональных климатических процессов и изменений.
- Анализ причин и оценки последствий климатических изменений.
- Анализ взаимодействия климата и биогеохимических циклов.
- Вихревая динамика атмосферы и анализ погодных режимов по эмпирическим и модельным данным
- Исследования, связанные с задачами адаптации к изменениям климата и его регулирования.

Приземная температура (2). 1961–1980 гг.

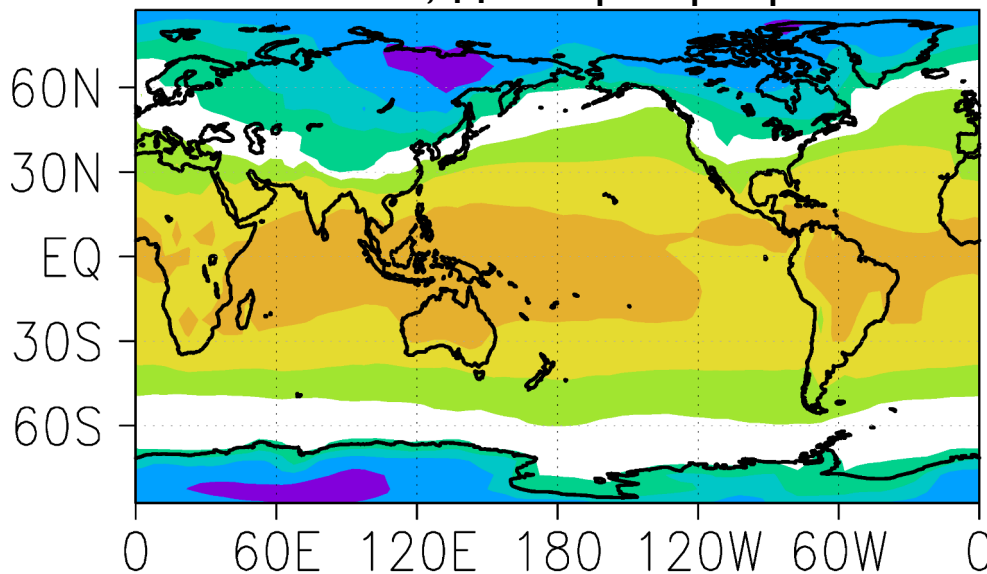
КМ ИФА РАН, декабрь–февраль



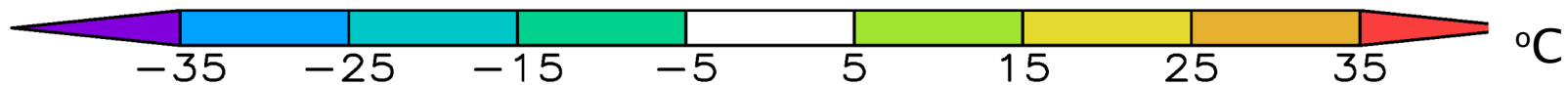
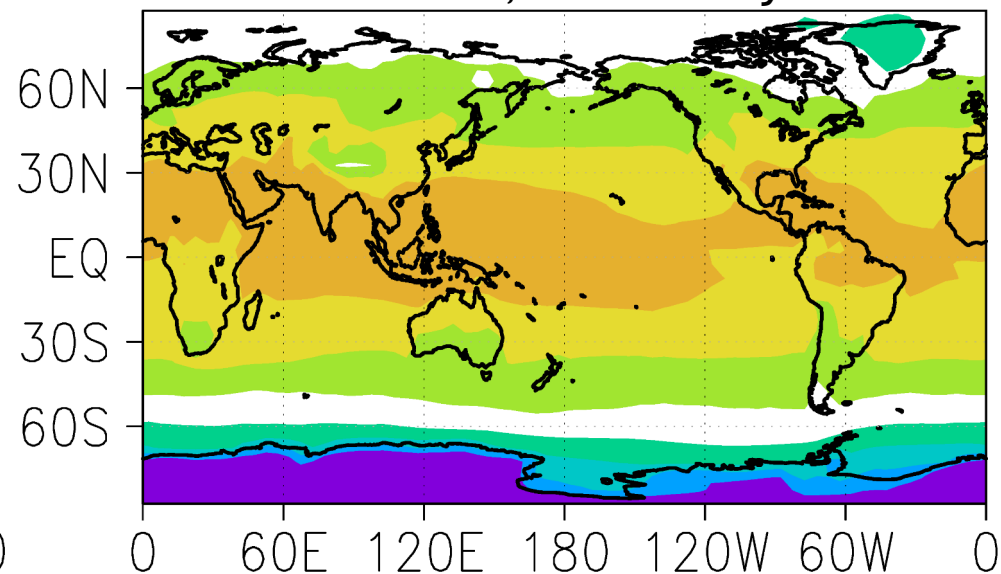
КМ ИФА РАН, июнь–август



HadCRUT4, декабрь–февраль

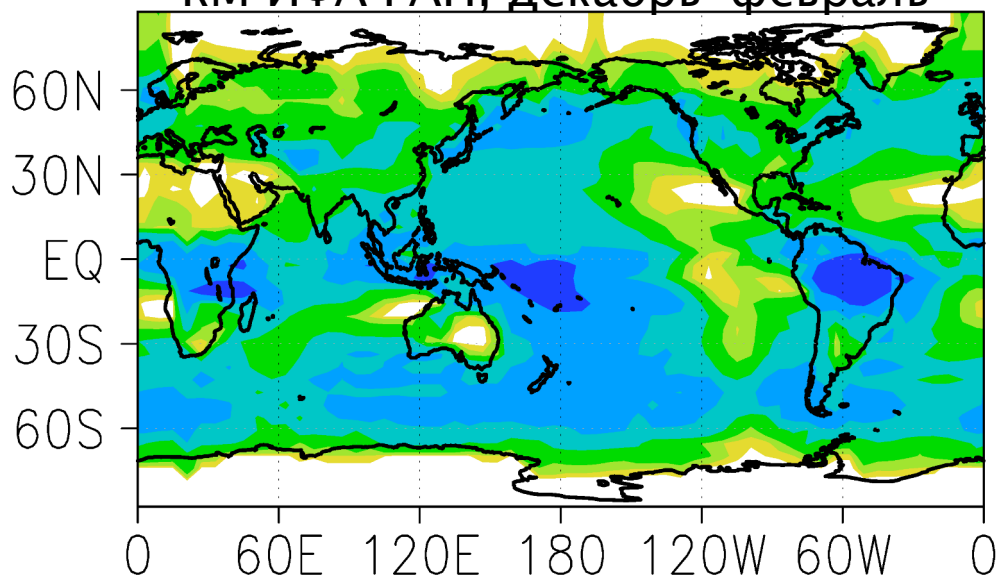


HadCRUT4, июнь–август

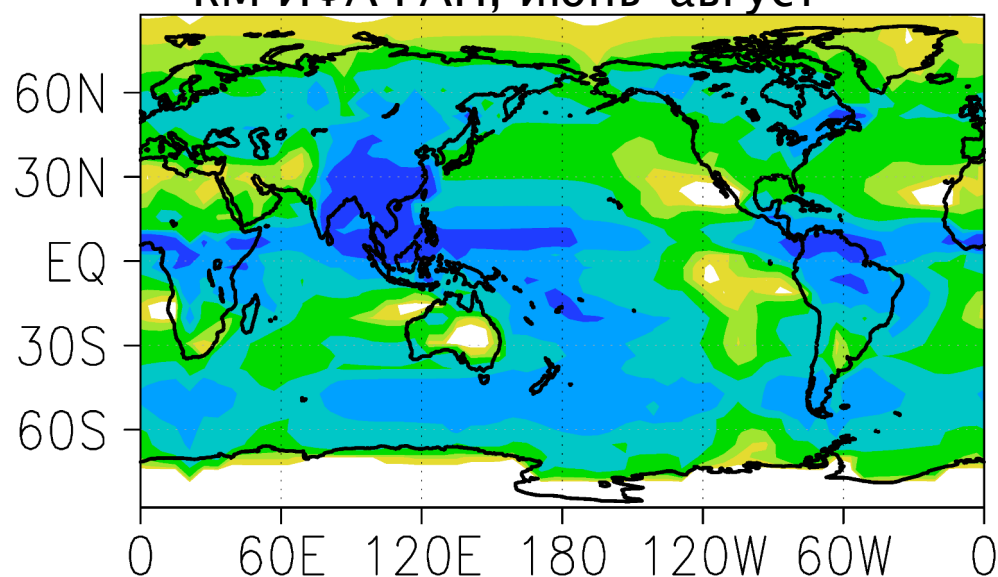


Осадки (2). 1979–1999 гг.

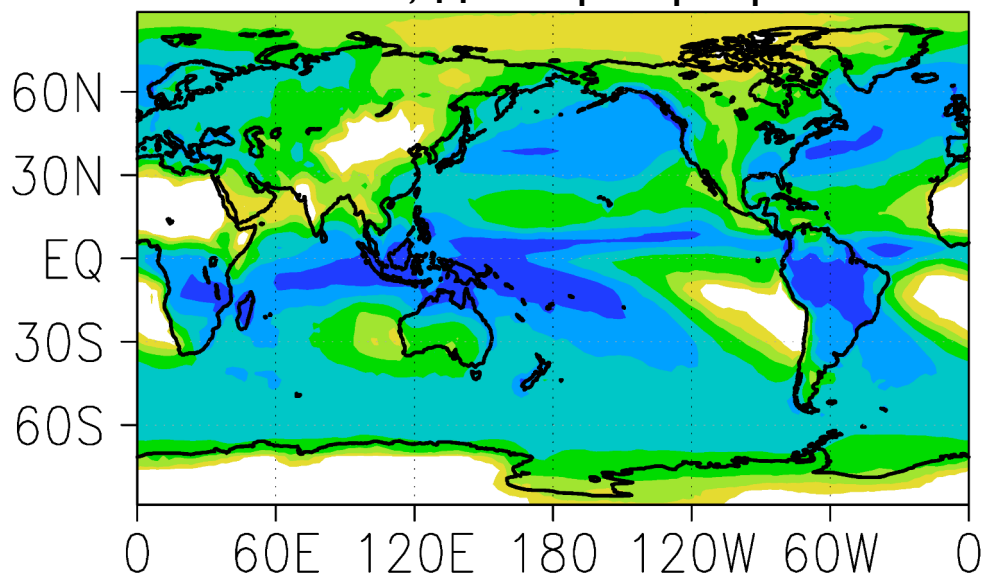
КМ ИФА РАН, декабрь–февраль



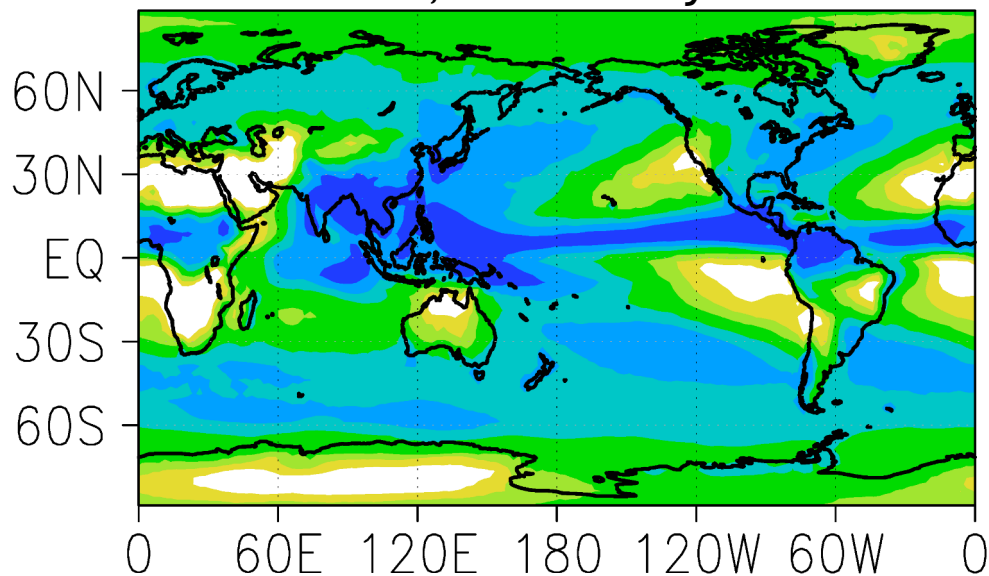
КМ ИФА РАН, июнь–август



GPCP-2.3, декабрь–февраль

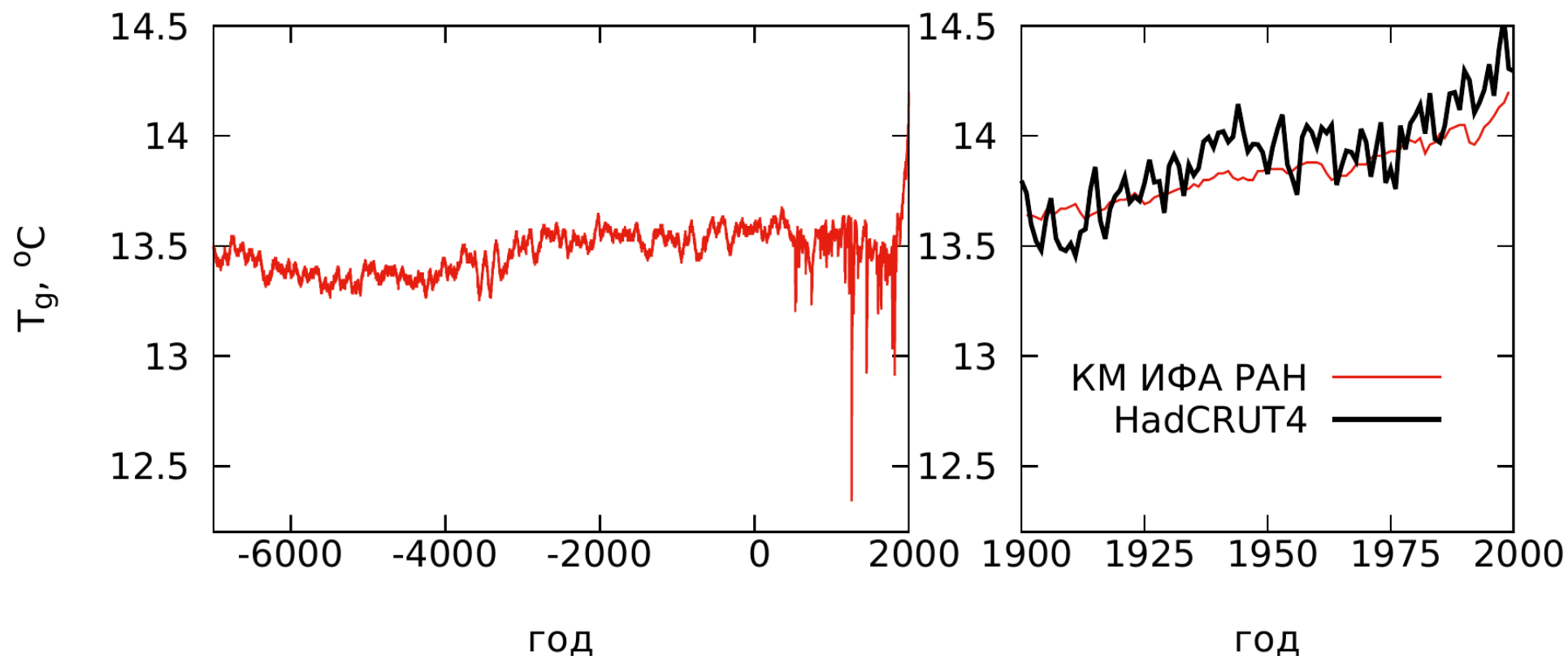


GPCP-2.3, июнь–август



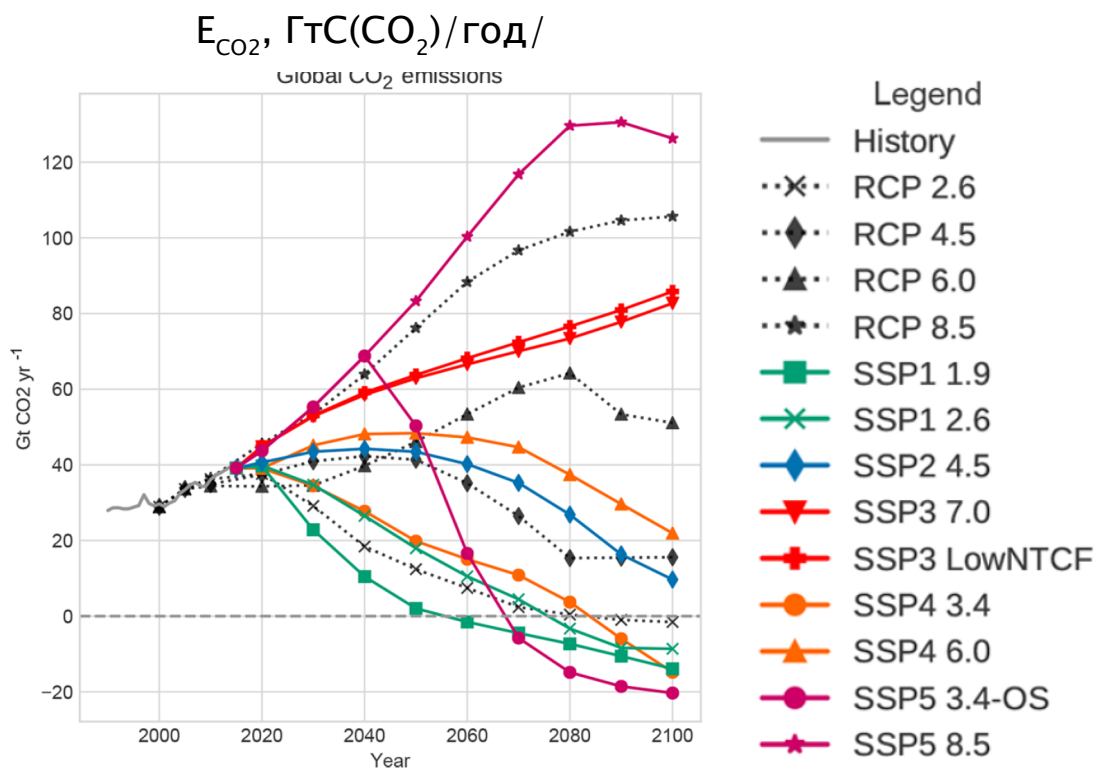
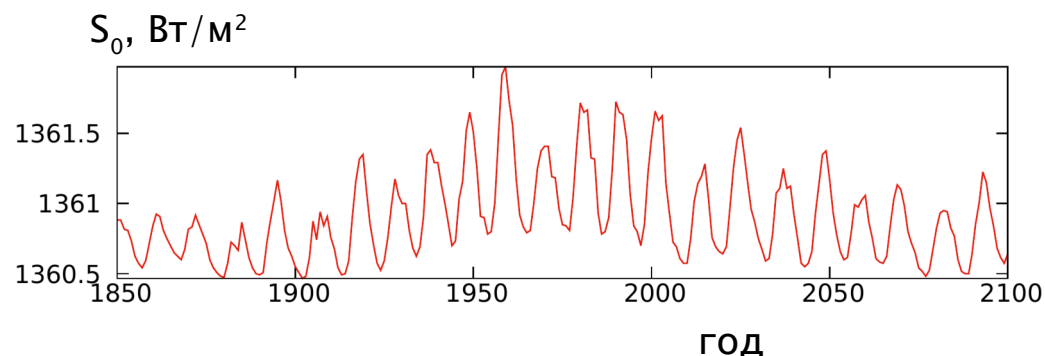
Приземная температура (1)

Глобальная среднегодовая

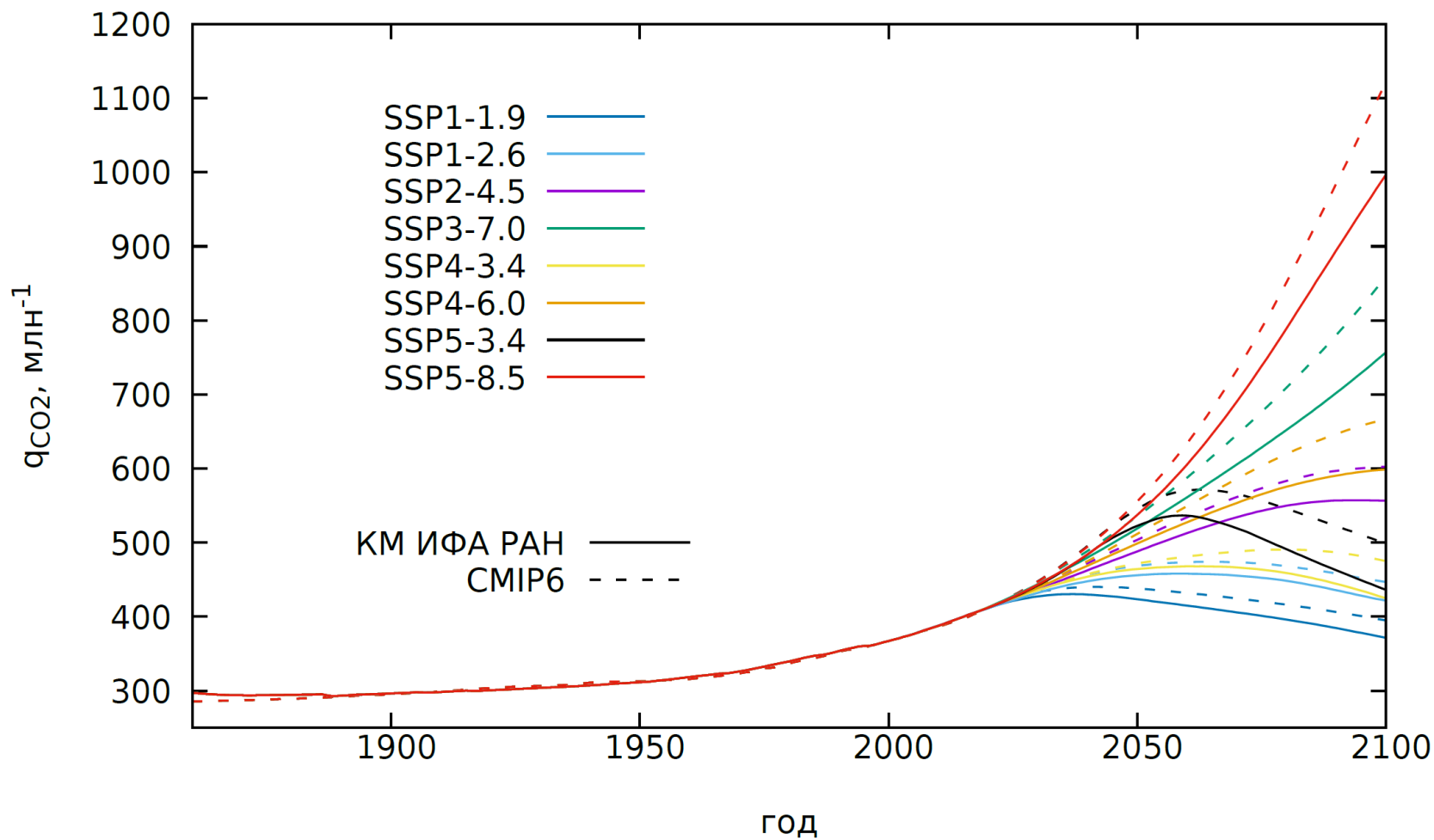


Внешние воздействия в XXI веке — сценарии SSP

- изменение солнечной постоянной
- эмиссии CO_2 атмосферы из-за сжигания ископаемого топлива и производства цемента
- содержание CH_4 и N_2O в атмосфере
- площадь пашень и лугов и плотность населения
- данные CMIP5 содержания SO_4^{--}



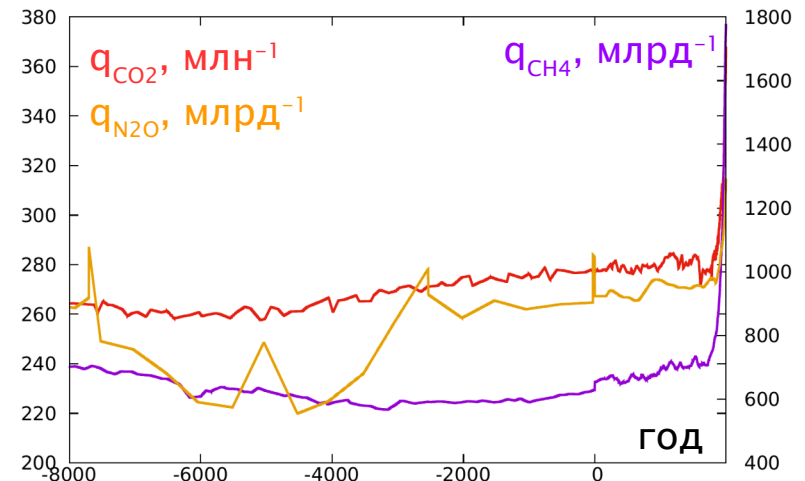
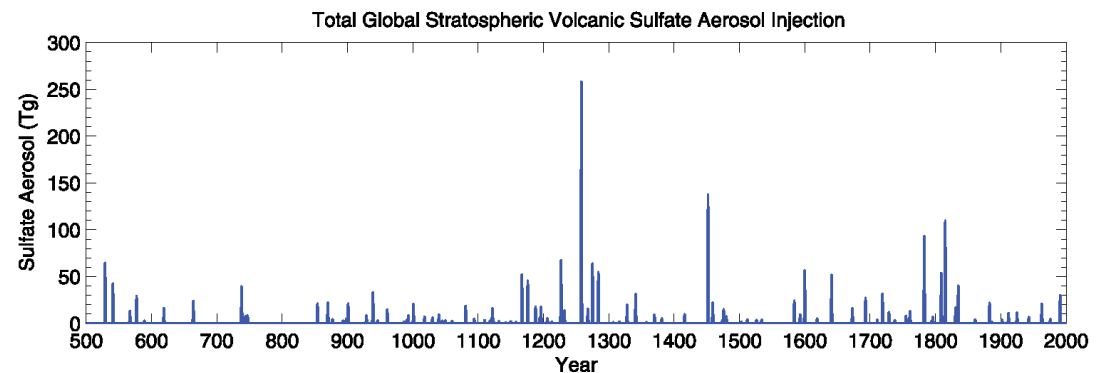
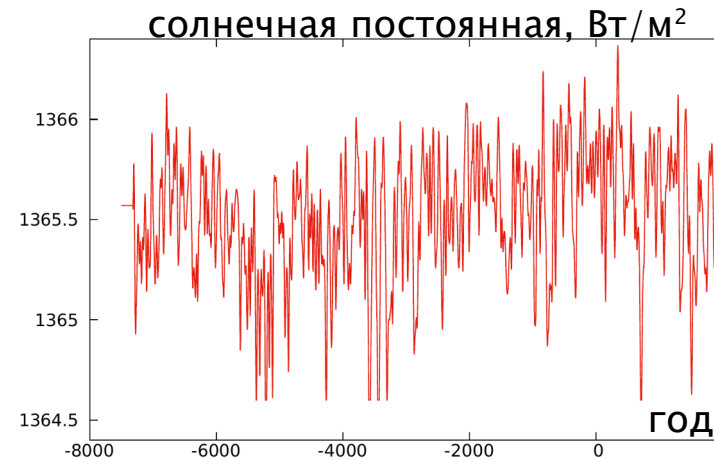
Концентрация углекислого газа в атмосфере



МЗС ИФА РАН: воспроизведение климата голоцена.

1. Внешние воздействия

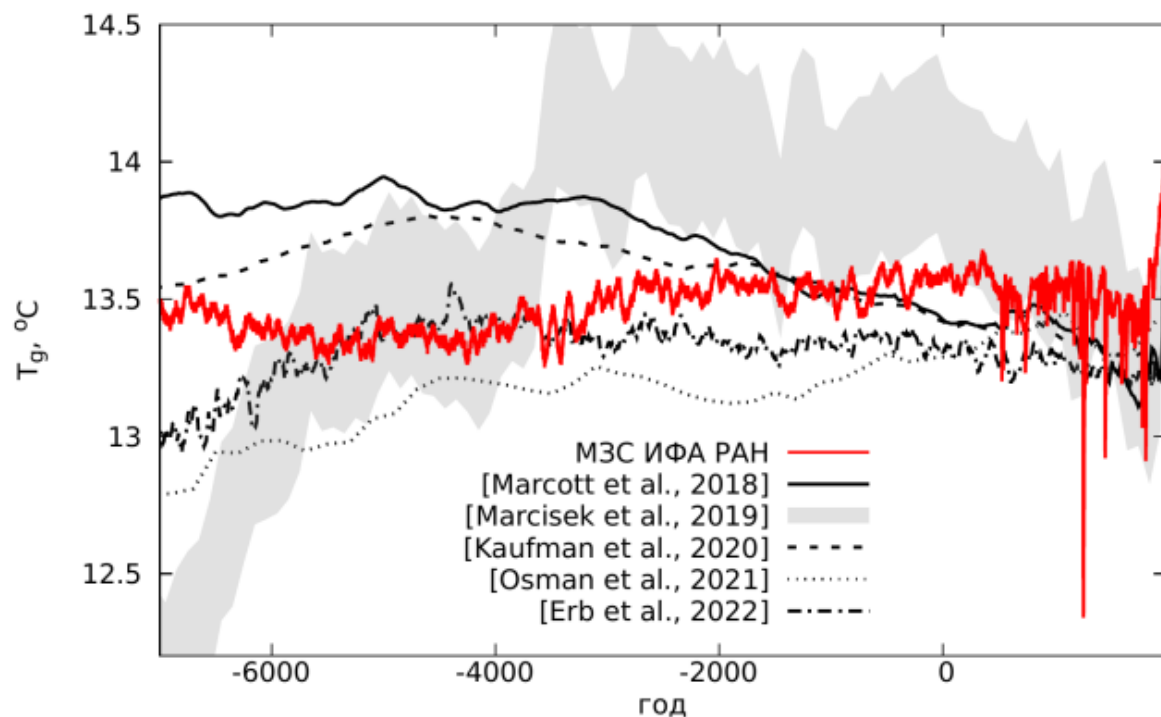
- Изменение параметров орбиты Земли [Laskar, 2011]
- Изменение солнечной постоянной (реконструкции ^{10}Be [Steinhilbert et al., 2009])
- Оптическая толщина аэрозоля в стратосфере [Gao et al., 2008] (только 500–2000 гг.)
- Содержание CO_2 , CH_4 и N_2O в атмосфере (данные ледового бурения в Антарктиде и Гренландии – CMIP5)
- Площадь пашень и лугов и плотность населения (HYDE-3.2)
- Данные CMIP5 содержания SO_4^{--} (1850–2000; ранее постоянны)



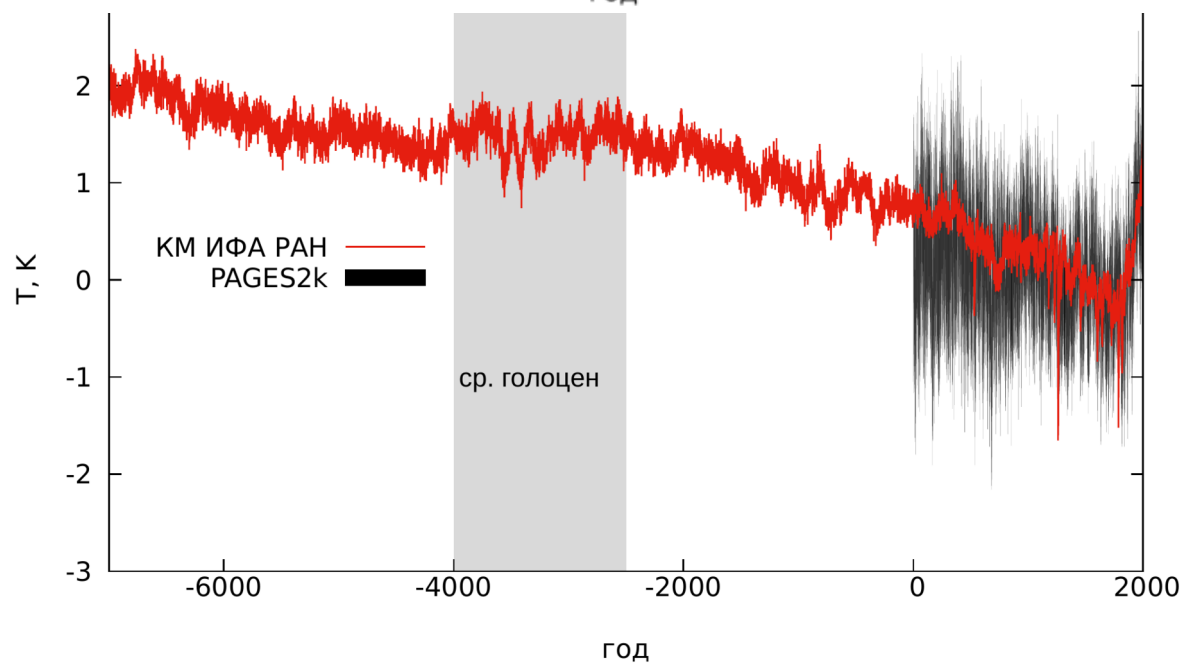
МЗС ИФА РАН: воспроизведение климата голоцена.

2. Приземная температура

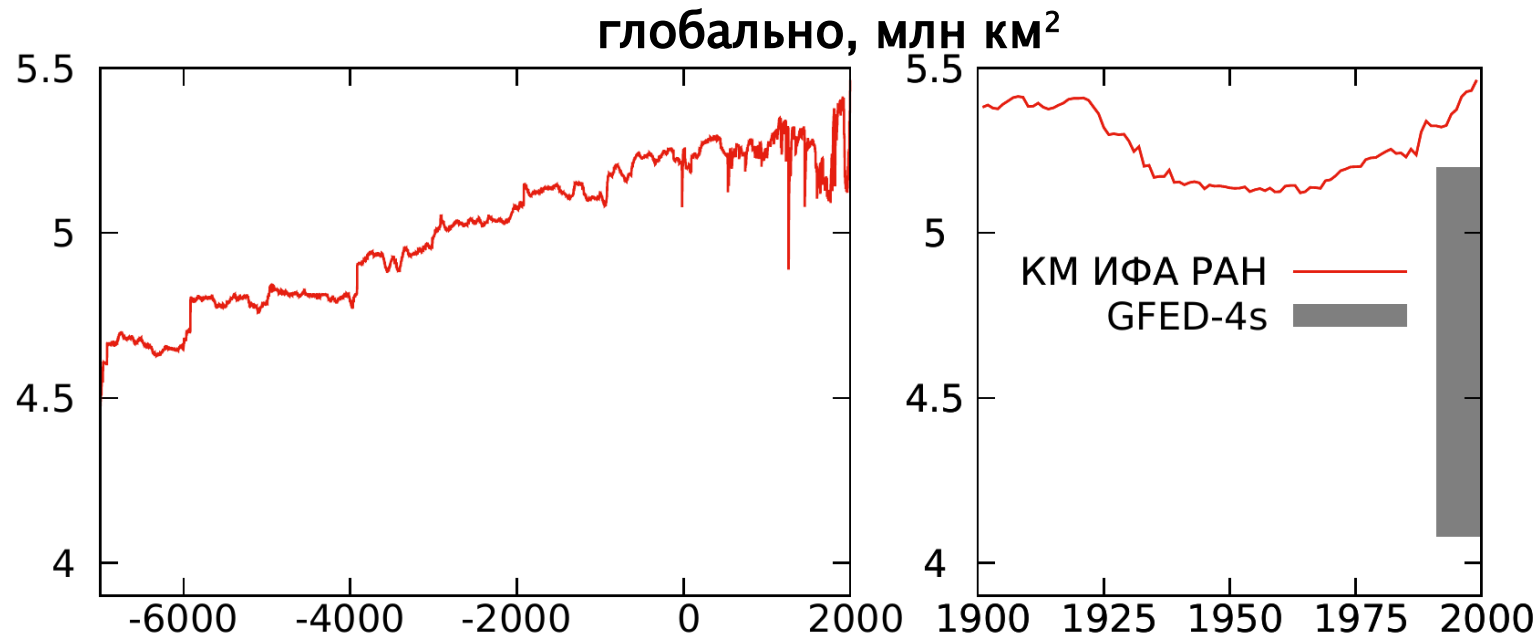
Средняя глобальная



Европа
(35–70°с.ш., 10°з.д.–
40°в.д.), июнь–август,
отклонение от средней за
1500–2000 гг.



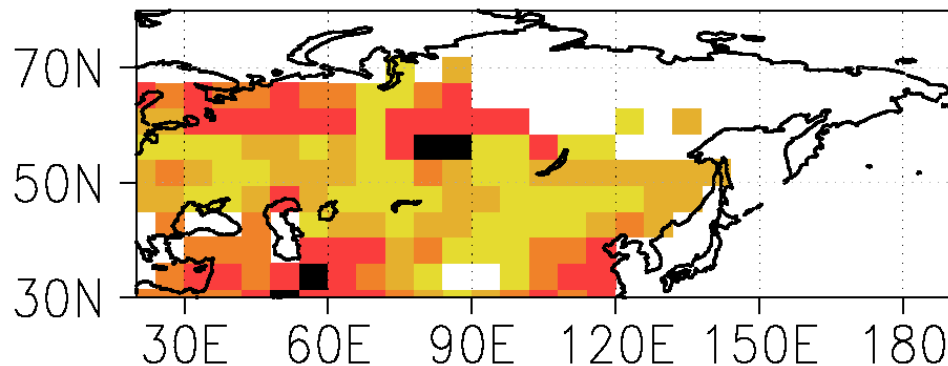
Площадь выгорания из-за природных пожаров



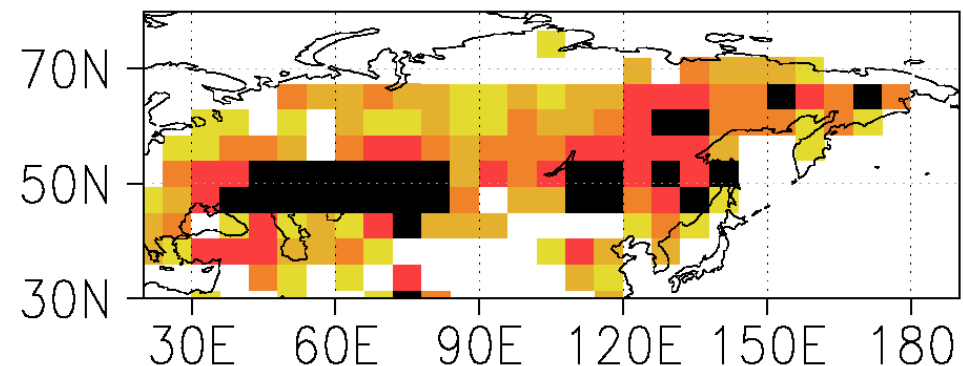
повторяемость пожаров, лет

(100 лет $\Leftrightarrow$ 1% площади ячейки выгорает ежегодно)

КМ ИФА РАН, 1900–1999 гг.

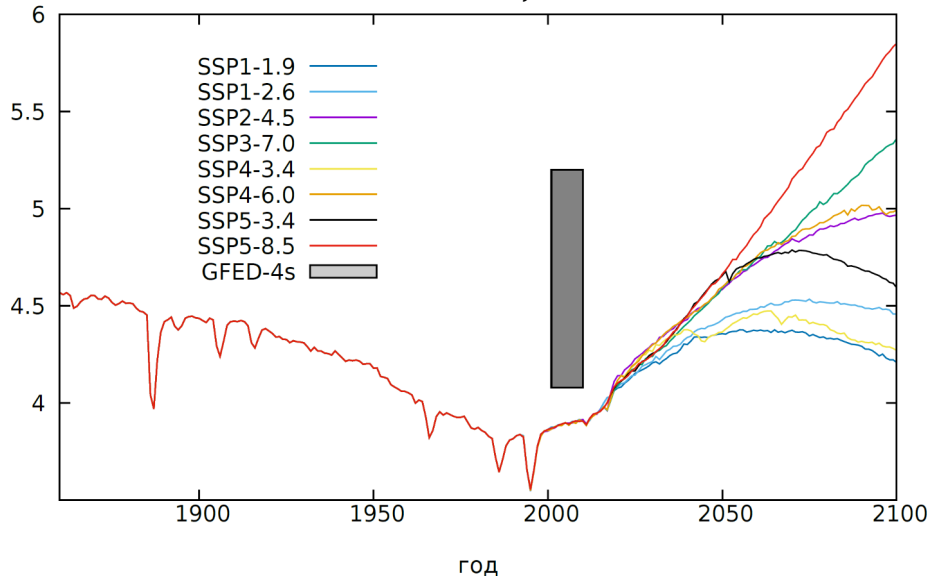


GFED, 1997–2011 гг.

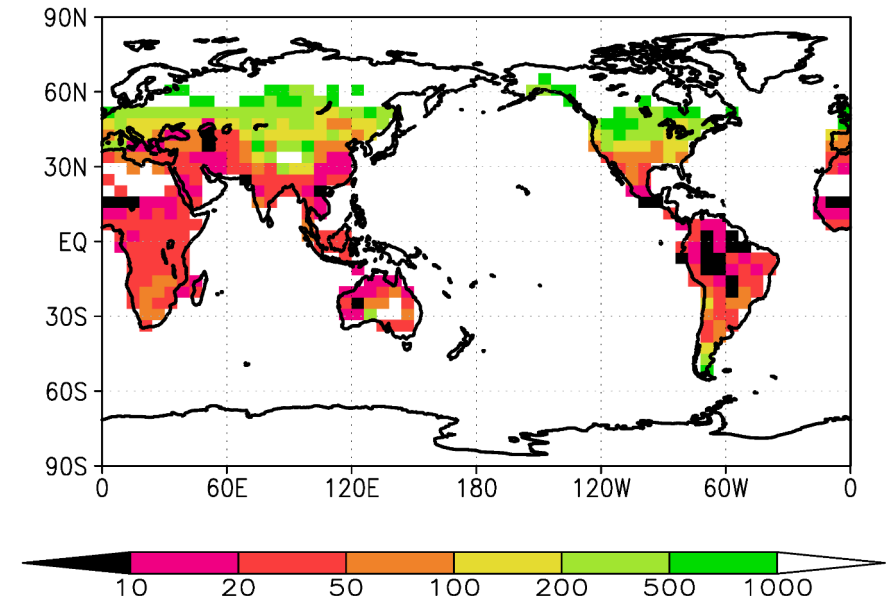


Площадь выгорания из-за природных пожаров

глобально, млн км²

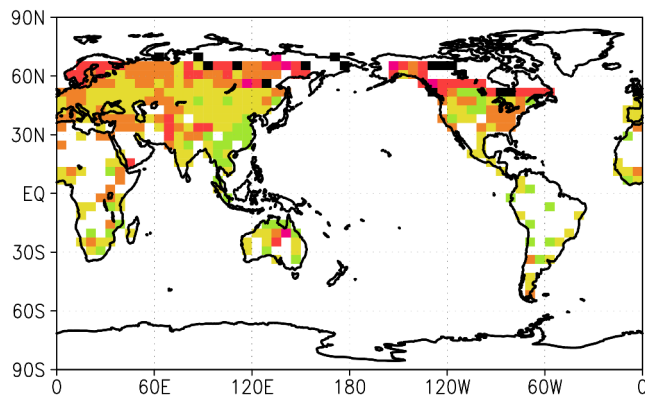


повторяемость пожаров, 1961–1990 гг., лет⁻¹

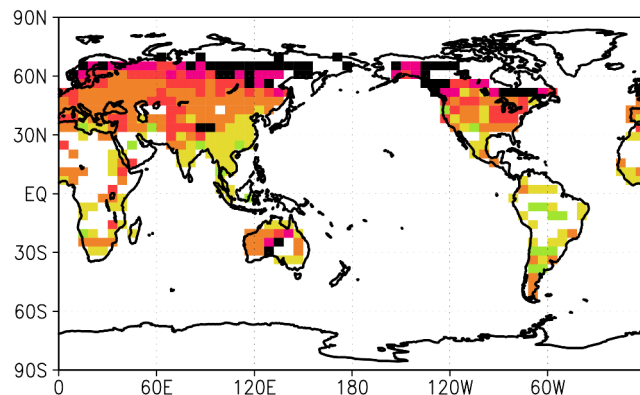


относительное изменение площади выгорания, %

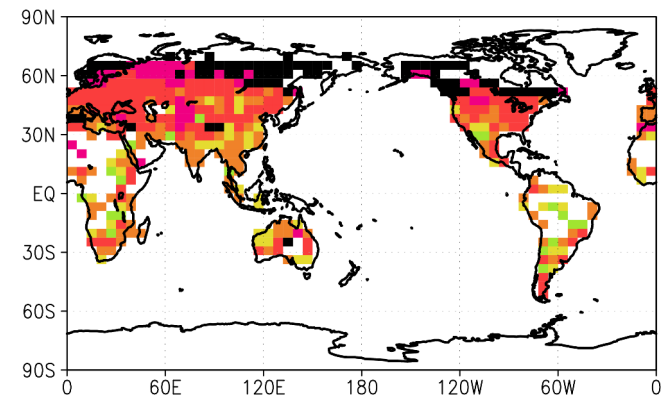
SSP1–1.9



SSP2–4.5



SSP5–8.5



Воспроизведение частоты молний [Елисеев и др., 2019] (1)

– Необходим статистический подход: ЧМ f связывается с характеристиками конвективной активности

[Price and Rind, 1992]:

$$f \propto h^\alpha,$$

h – высота верхней границы конвективных облаков

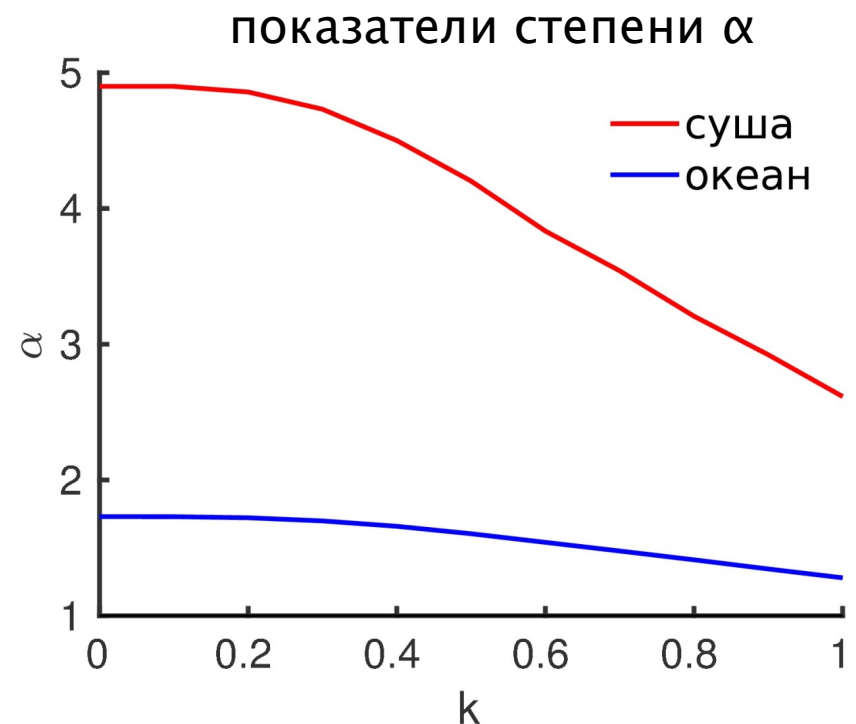
– Размер вычислительной ячейки МЗС ($\gtrsim 10^1$ км) и шага по времени ($\gtrsim 10^4$ с) намного больше типичного горизонтального размера ($\lesssim 10^1$ км) и шага по времени ($\lesssim 10^4$ с)

Предположения:

– Высоты верхних границ конвективных облаков h распределены по Г-закону с параметром формы $a > 1$ и параметром масштаба b

– $(a, b) \Rightarrow$

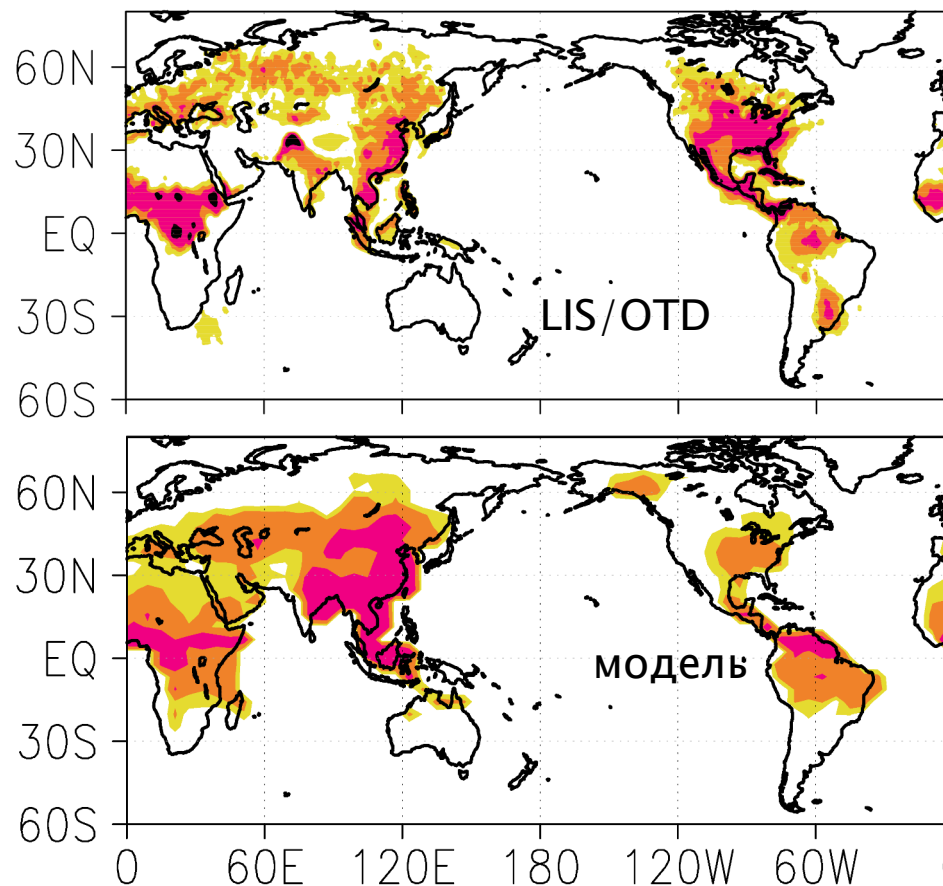
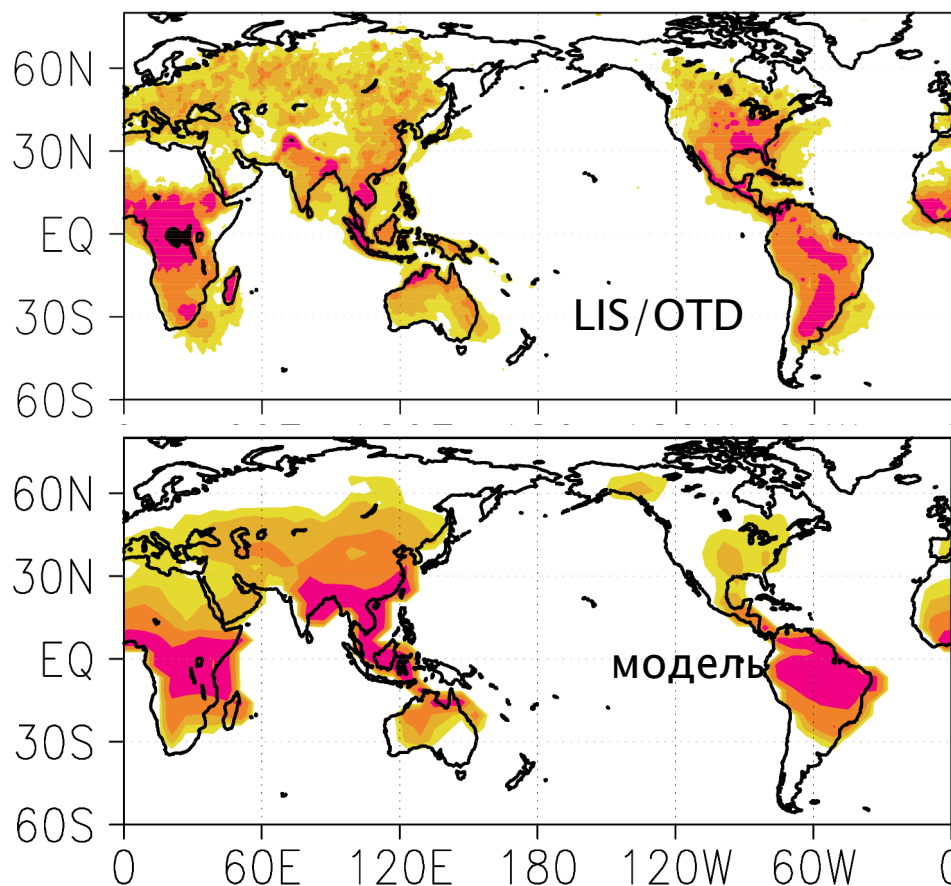
(среднее по ансамблю $H = a b$,
коэффициент вариации $k = a^{-1/2} < 1$)



Воспроизведение частоты молний [Елисеев и др., 2019] (2) ЧМ, 1995–2014 гг.

среднегодовая, $\text{км}^{-2} \text{год}^{-1}$

июль–август, $\text{км}^{-2} \text{мес}^{-1}$

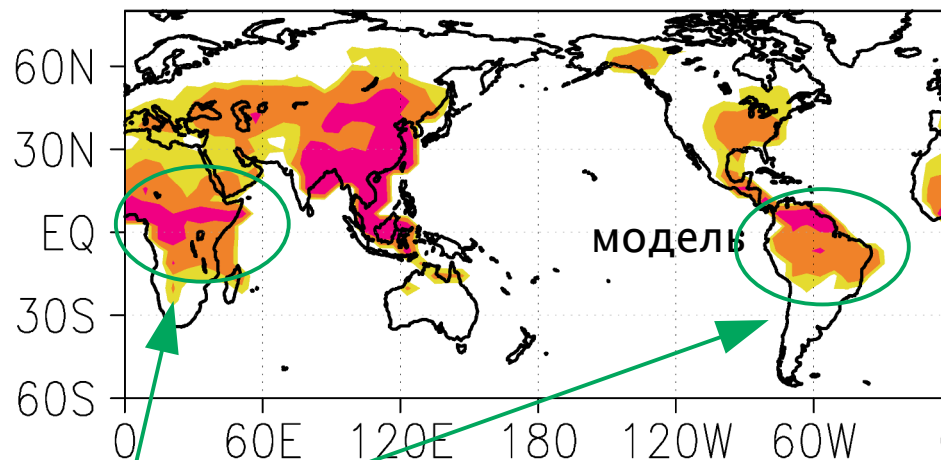
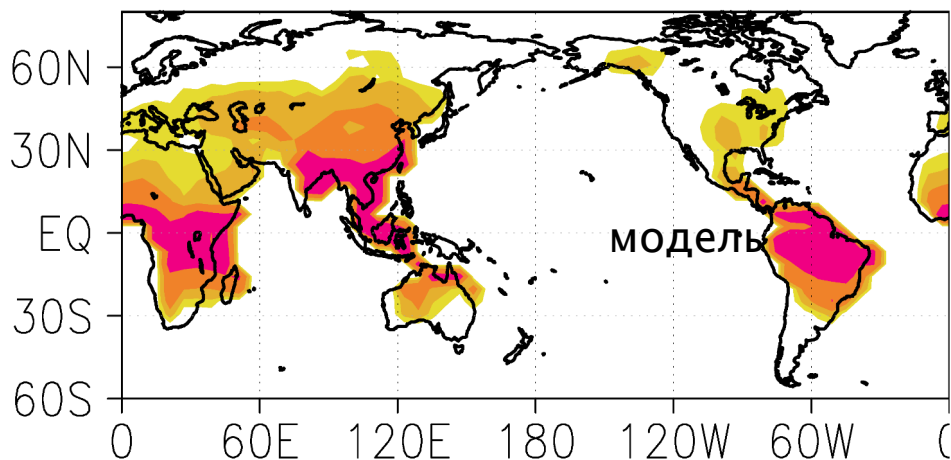
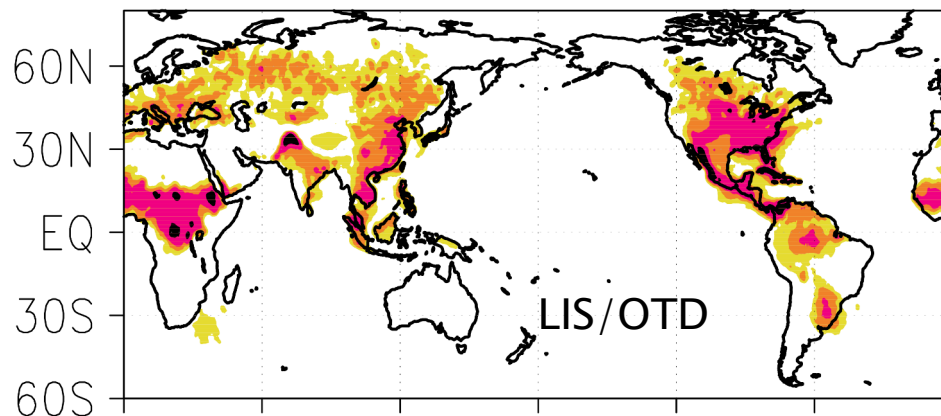
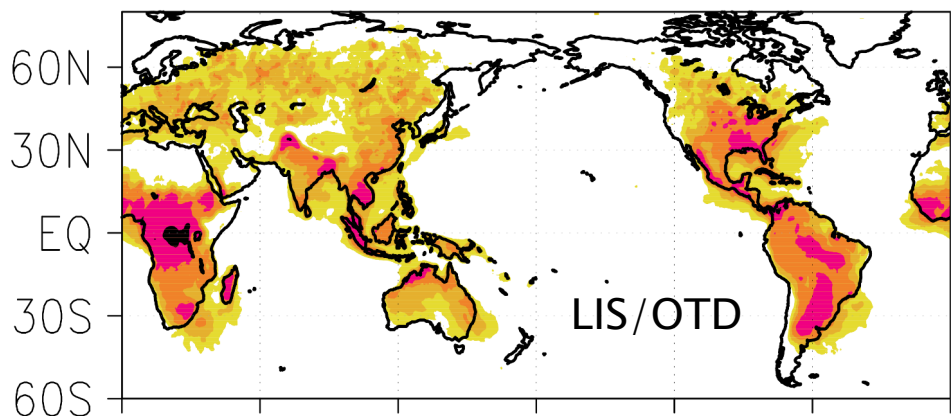


все модели характеризуются большей ЧМ в Южной Америке, чем в Африке. В МЗС ИФА РАН ЧМ эта ошибка убрана

Воспроизведение частоты молний [Елисеев и др., 2019] (2) ЧМ, 1995–2014 гг.

среднегодовая, $\text{км}^{-2} \text{год}^{-1}$

июль–август, $\text{км}^{-2} \text{мес}^{-1}$



все модели характеризуются большей ЧМ в Южной Америке, чем в Африке. В МЗС ИФА РАН ЧМ эта ошибка убрана