



Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Лаборатория теории климата

Фазовые соотношения между изменениями глобальной температуры и содержания CO_2 в атмосфере при комбинированном воздействии на Земную систему

Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Денисов С.Н., Тимажев А.В., Климович Г.П.

V Всероссийская конференция с международным участием

«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»

Посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова

19-21 ноября 2024

МОСКВА

Расчет временного лага:

Временной лаг Δ между рядами q и T определяется из условия максимизации *коэффициента корреляции* со сдвигом между этими рядами

[Мохов и др., 2005; Ganopolski and Roche, 2009; Humlum et al., 2013]

$$r_{qT} = \frac{\sum_{i=1}^P (q_i - \bar{q})(T_{i+\Delta} - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (q_i - \bar{q})^2 (T_{i+\Delta} - \bar{T})^2}}$$

Для детерминистских систем временному лагу Δ , определенному таким образом, соответствует фазовая задержка между функциями $q(t)$ и $T(t)$.

Знак временного лага между рядами T и qCO_2 зависит от:

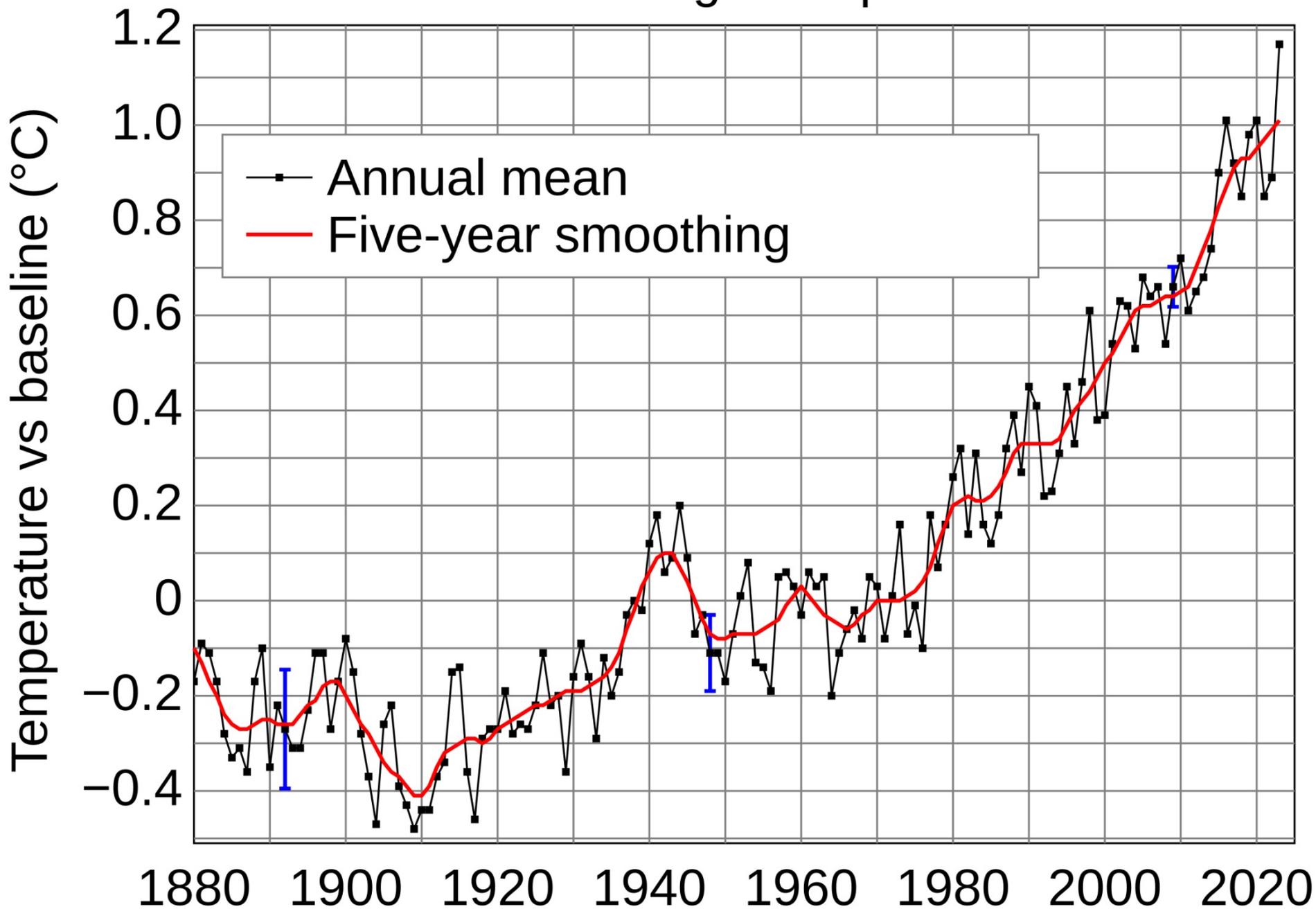
- **Типа** внешнего воздействия на ЗС;
- **Временного масштаба** внешнего воздействия на ЗС;
- **Амплитуды** внешнего воздействия на ЗС;
- **Фазы** изменений T и qCO_2 (возрастание / убывание).

Эти результаты были получены ранее при исследовании отклика ЗС на разные типы внешнего воздействия, взятые отдельно друг от друга (напр., эмиссии CO_2 или вариации солнечной постоянной).

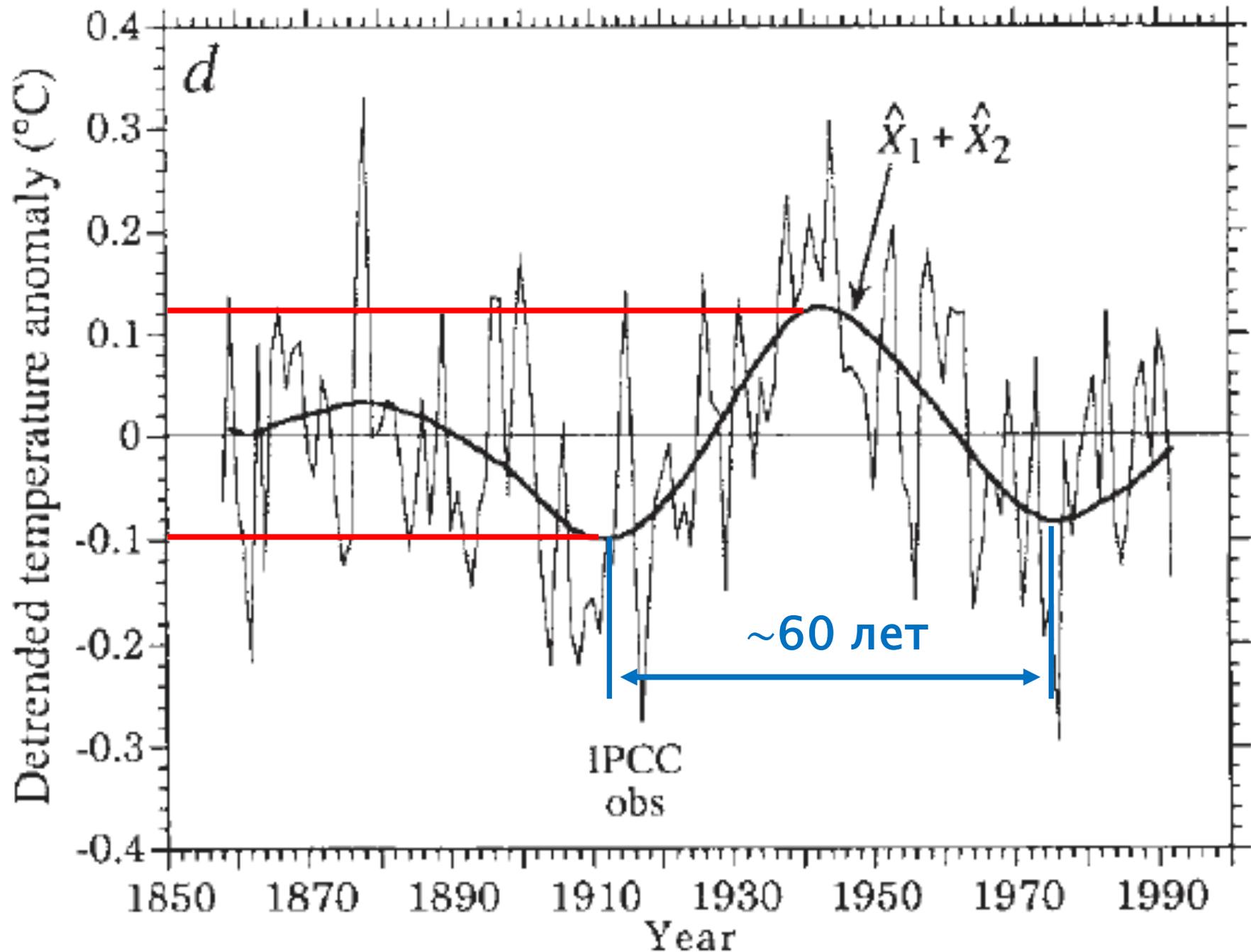
А что будет при «комбинированном воздействии»?

Изменения глобальной температуры

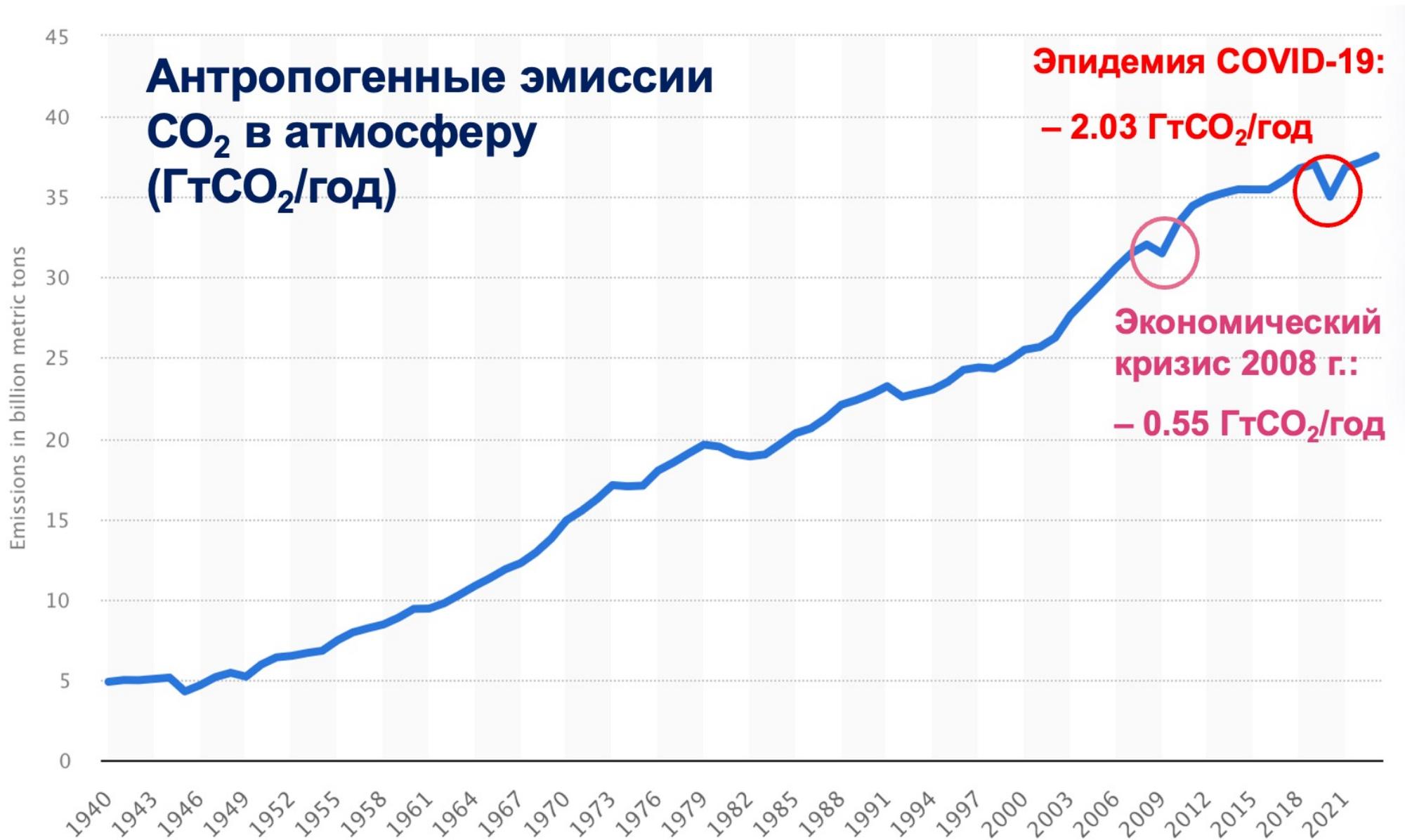
Global Average Temperature



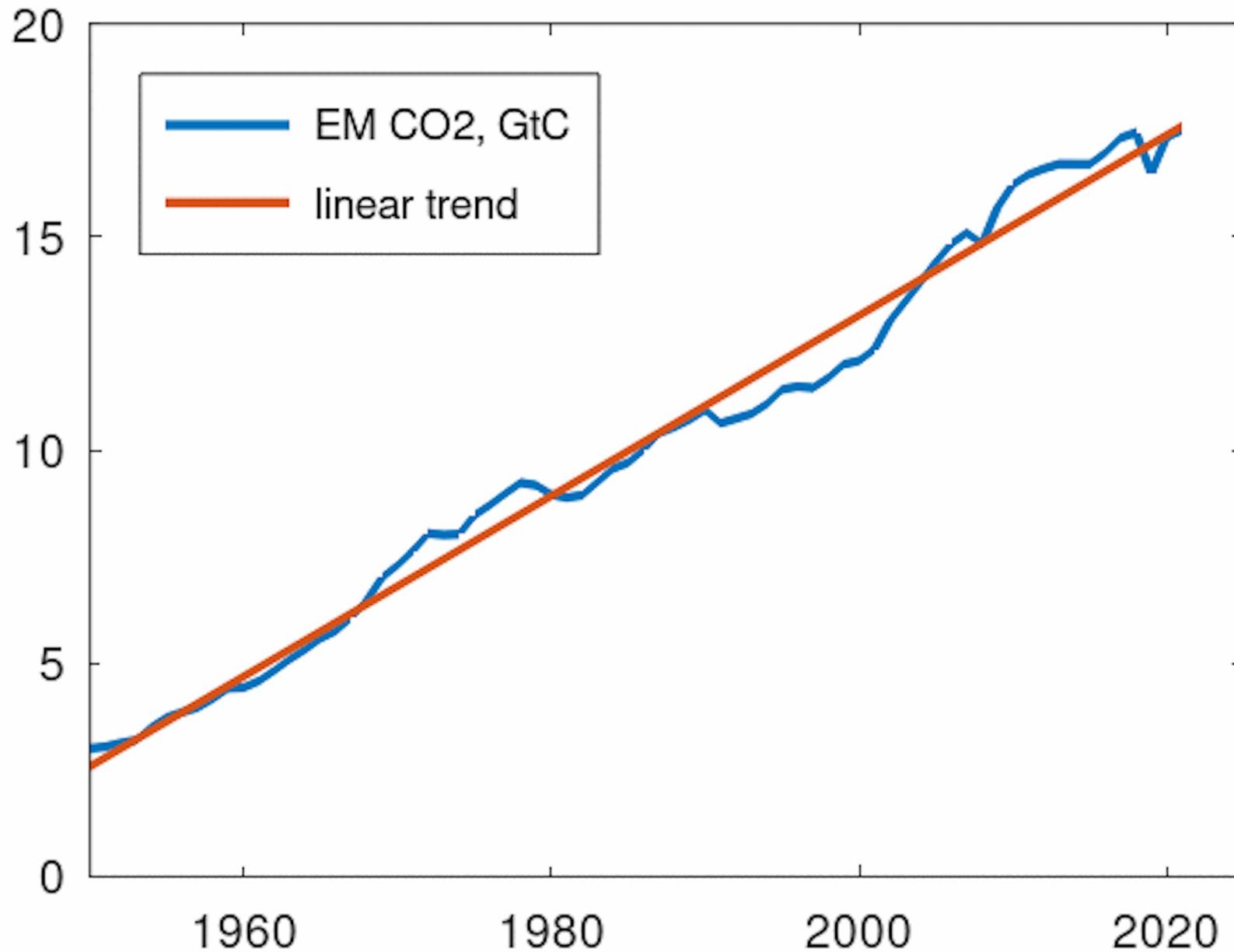
Atlantic multidecadal oscillation (AMO)



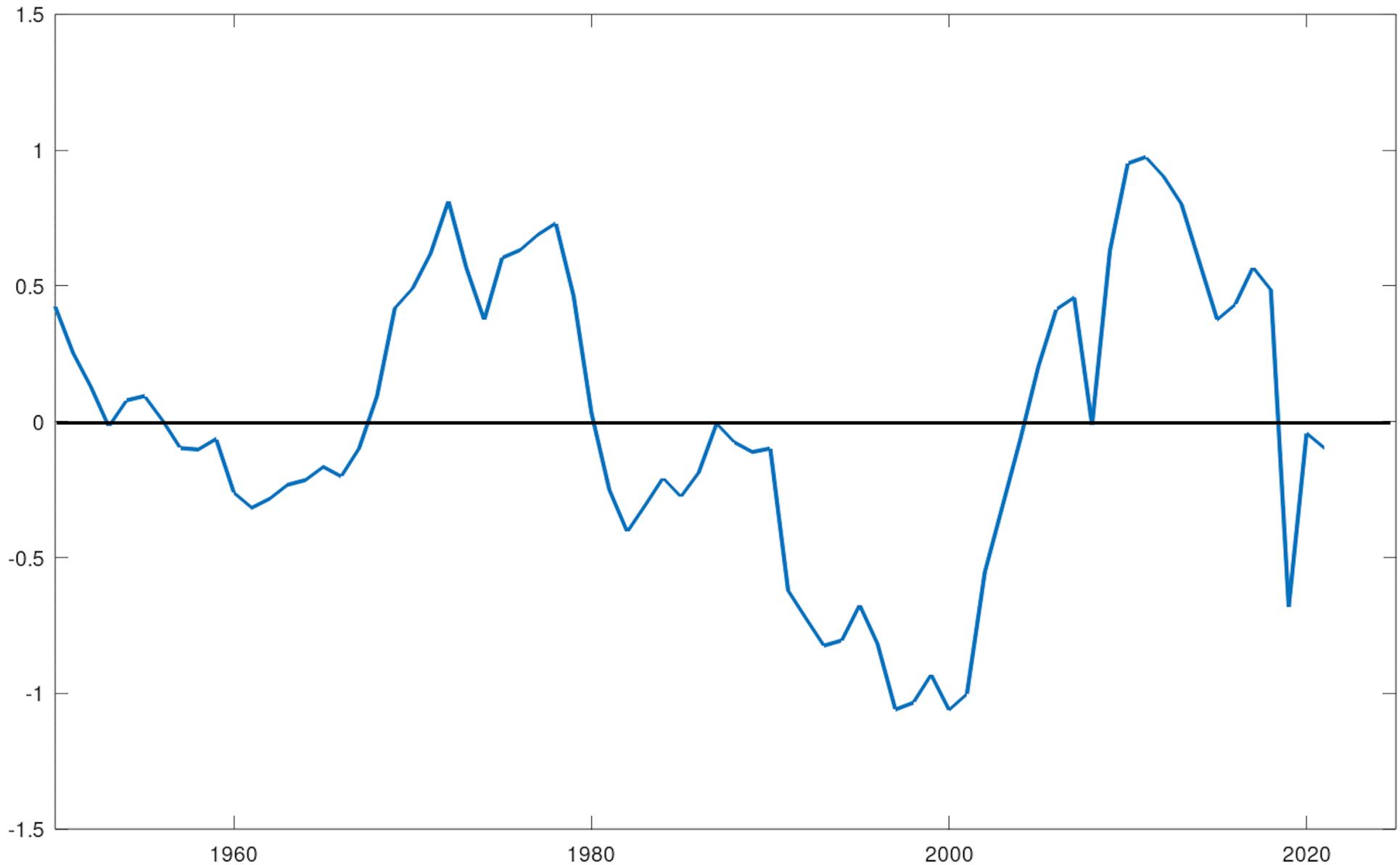
Антропогенные эмиссии CO₂



Вариации антропогенных эмиссий CO₂ в атмосферу



Вариации антропогенных эмиссий CO₂ в атмосферу, ГтС/год



Экономические циклы Кондратьева

Период колебаний ~ 50 лет



Численные эксперименты

С Моделью Земной системы ИФА РАН (МЗС ИФА РАН) поставлены численные эксперименты по оценке изменений климата в **2020-3000** гг. при комбинированном внешнем воздействии на Земную систему, включающем в себя:

- 1) антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу (E);
- 2) знакопеременный поток энергии в поверхностный слой океана и деятельный слой суши, соответствующий естественной изменчивости климата (N).

Эмиссии CO_2 (E) задавались в соответствие со сценарием SSP1-2.6, продолженным до 3000 г. и дополненным синусоидальными вариациями с амплитудами {0.1, 0.5, 1.0} ГтС/год и периодом 50 лет, соответствующим среднему значению периода экономических циклов Кондратьева.

Поток энергии F задавался в виде синусоидальной функции с периодом 60 лет, характерным для естественной изменчивости климата, и амплитудами {0.05%, 0.1%, 0.25%, 0.5%} от значения солнечной постоянной 1366.09 Вт/м².

Комбинированное воздействие на ЗС (условия численных экспериментов)

Эмиссии CO₂ в атмосферу:

сценарий **SSP1-2.6**, продолженный до 3000 г.

+

вариации $E_v = E_A \sin\left(\frac{2\pi}{P_E} t\right)$,

где $P_E = 50$ лет, $E_A = \{0.1, 0.5, 1.0\}$ ГтС/год

Естественная изменчивость:

сценарий **SSP1-2.6** (для TSI), продолженный до 3000 г.

+

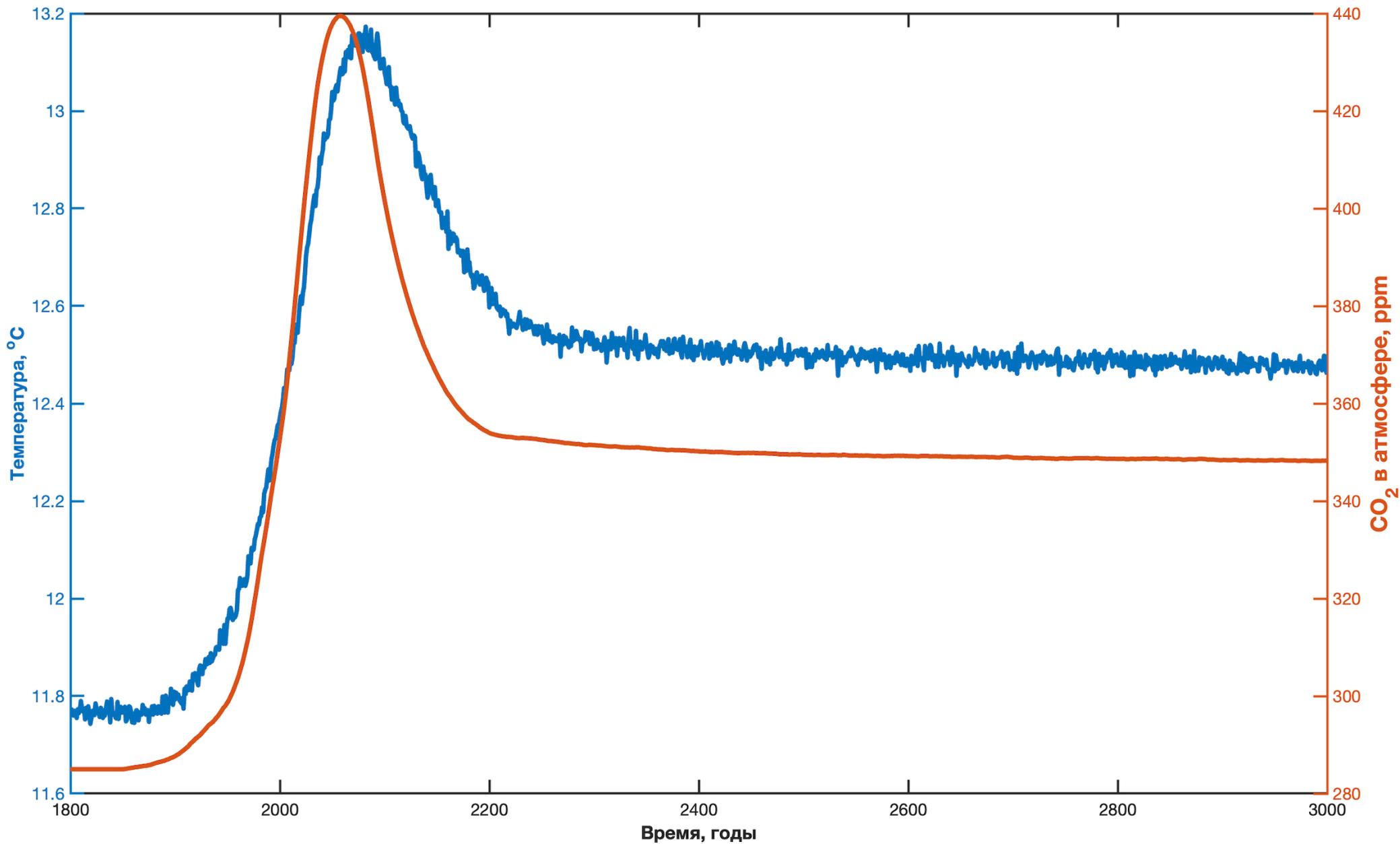
вариации $N_v = N_A \sin\left(\frac{2\pi}{P_N} t\right)$,

где $P_N = 60$ лет, $N_A = \{0.05\%, 0.1\%, 0.25\%, 0.5\%\}$

от значения солнечной постоянной (TSI) = **1366.09 Вт/м²**.

Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

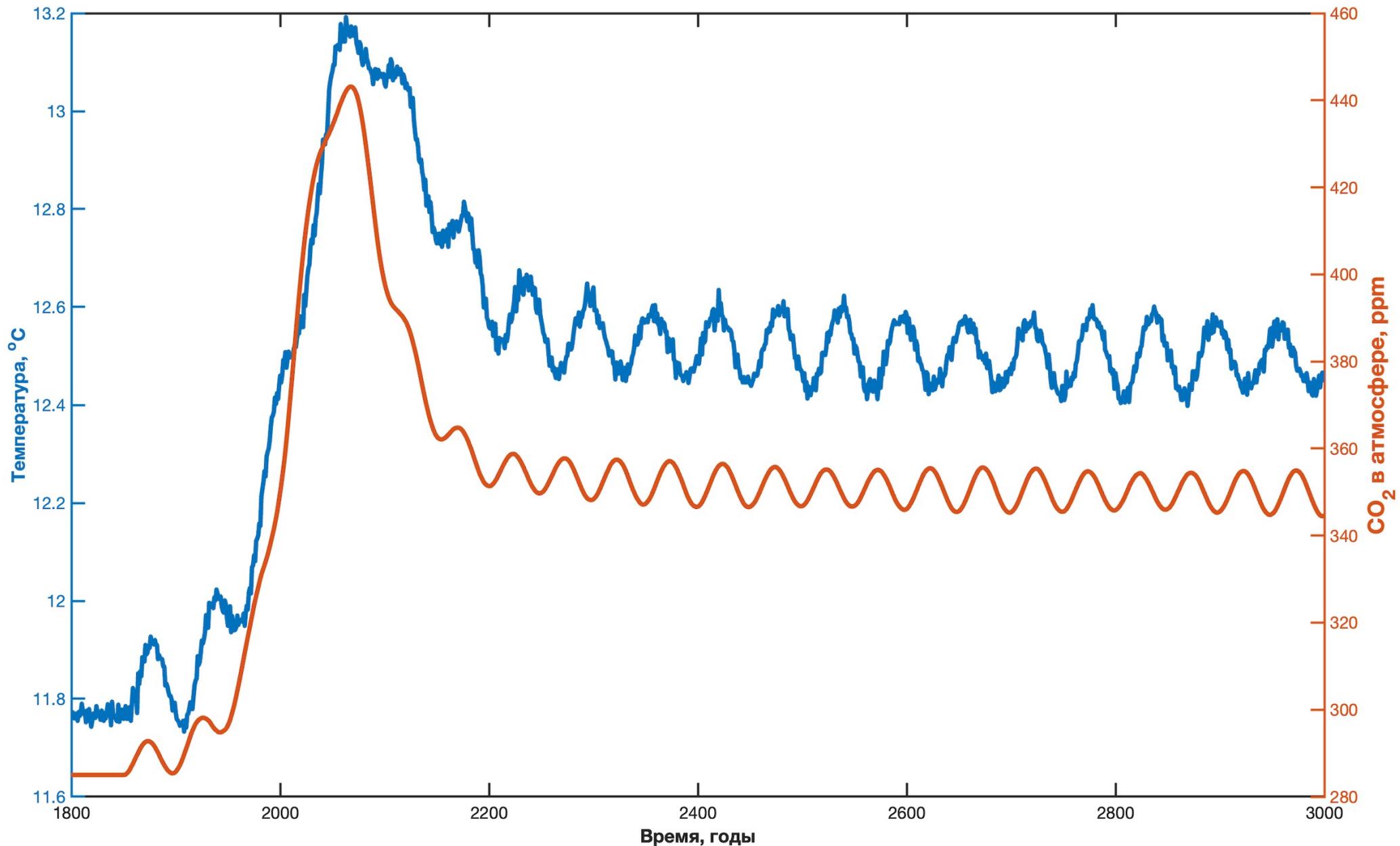


Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.5$ ГтС/год
 $N_A = 0.1\%$ TSI



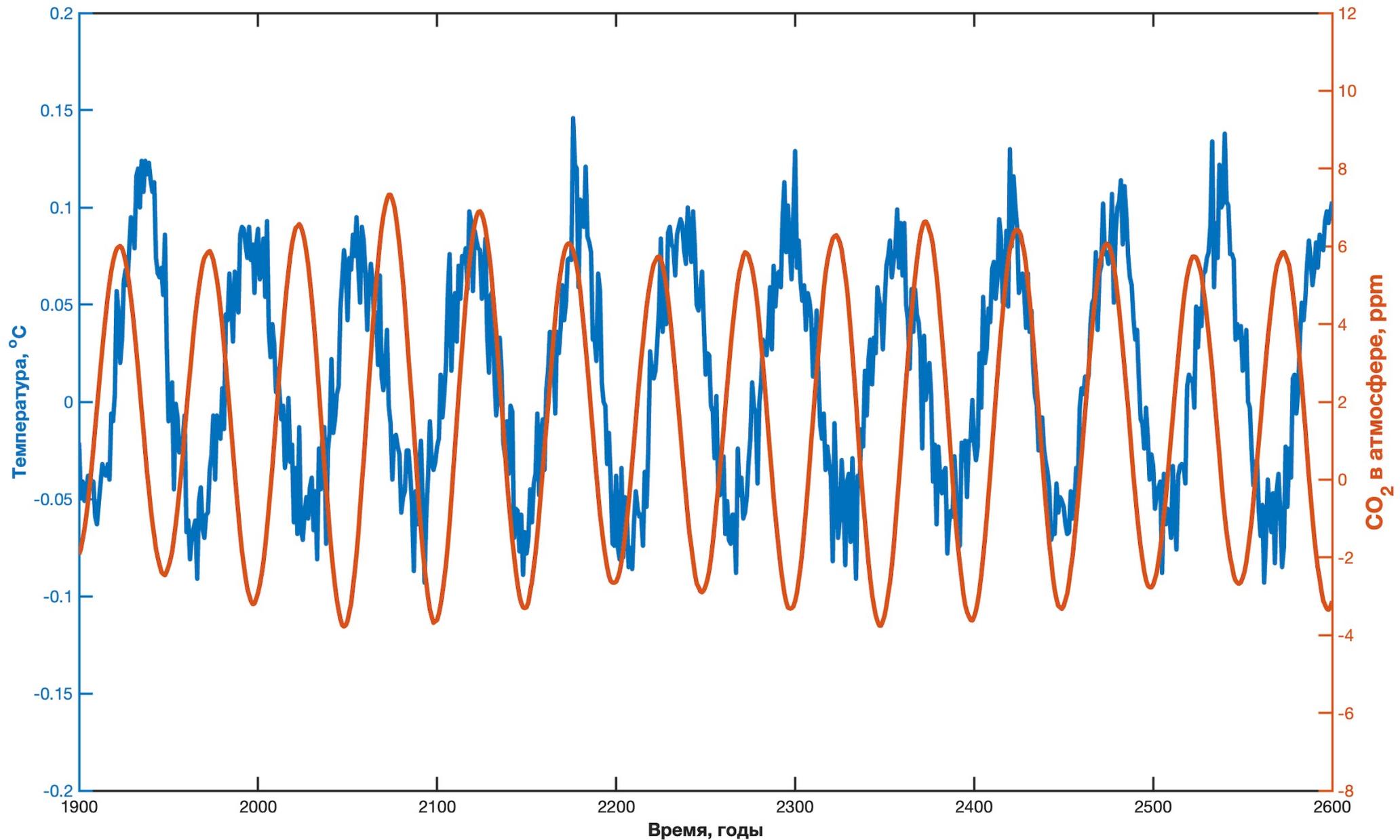
Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.5$ ГтС/год

$N_A = 0.1\%$ TSI



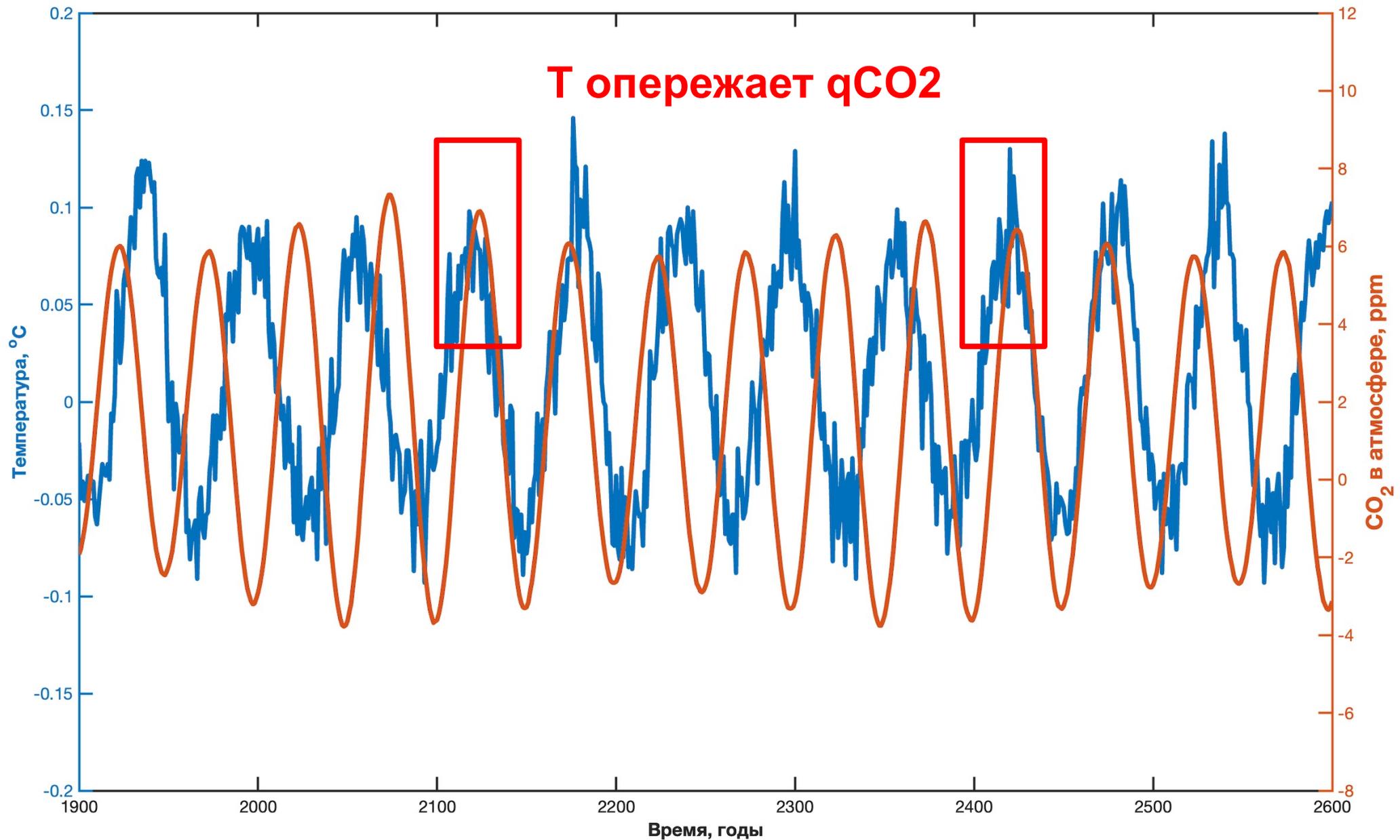
Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.5$ ГтС/год

$N_A = 0.1\%$ TSI

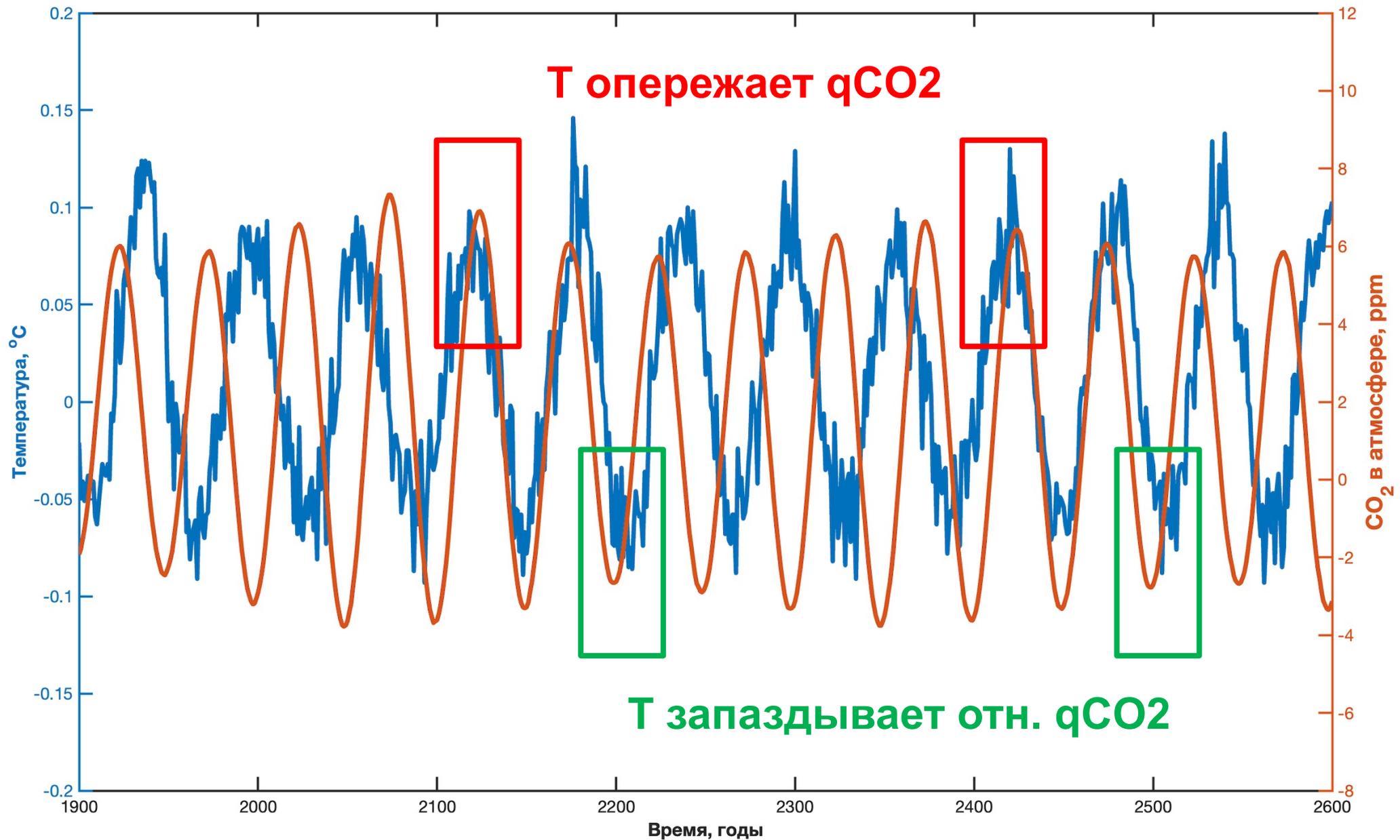


Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.5$ ГтС/год
 $N_A = 0.1\%$ TSI



Расчет временного лага:

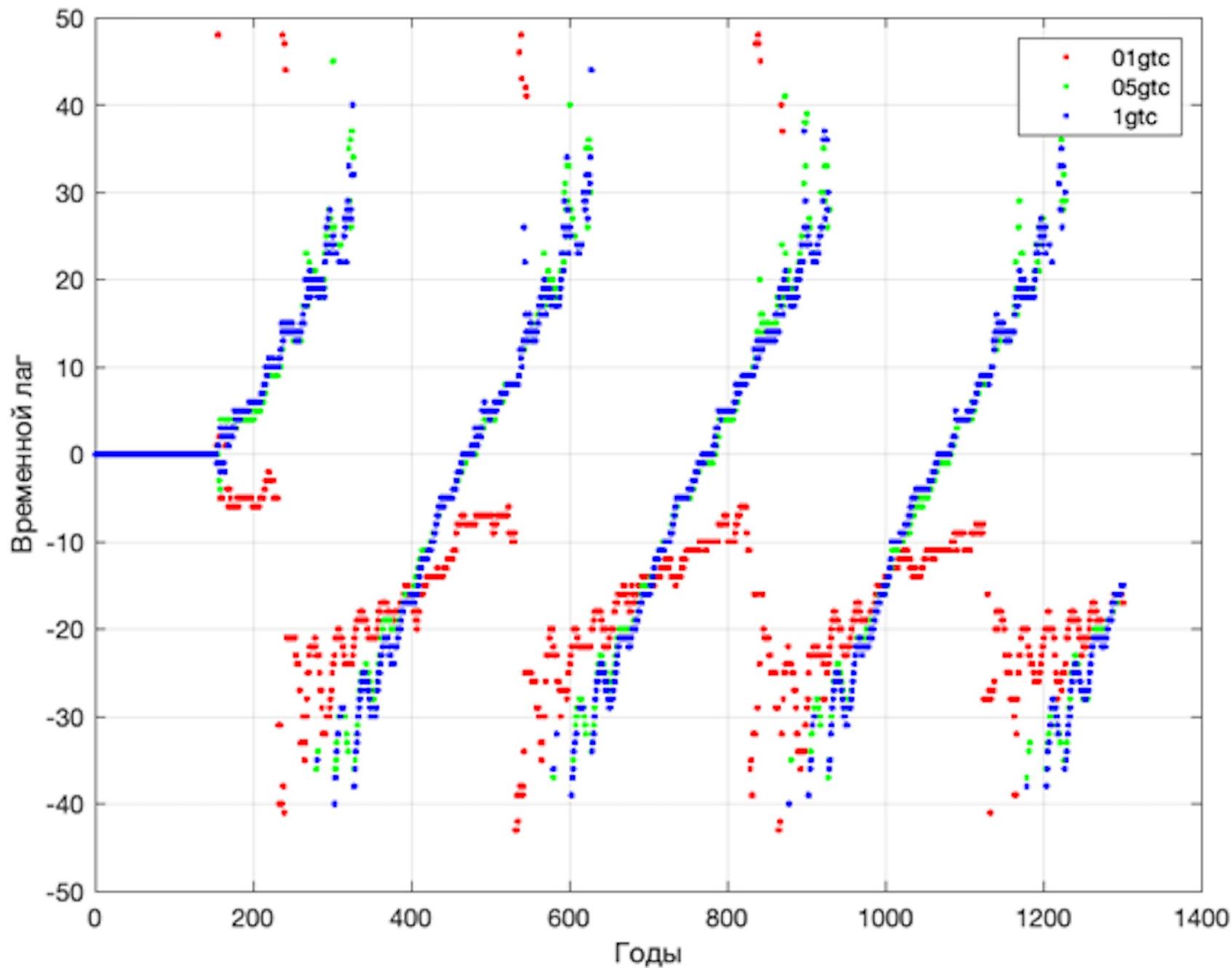
Временной лаг Δ между рядами q и T определяется из условия максимизации *коэффициента корреляции* со сдвигом между этими рядами

[Мохов и др., 2005; Ganopolski and Roche, 2009; Humlum et al., 2013]

$$r_{qT} = \frac{\sum_{i=1}^P (q_i - \bar{q})(T_{i+\Delta} - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^P (q_i - \bar{q})^2 (T_{i+\Delta} - \bar{T})^2}}$$

Для детерминистских систем временному лагу Δ , определенному таким образом, соответствует фазовая задержка между функциями $q(t)$ и $T(t)$.

Временной лаг между T и q в скользящем окне 50 лет при $N_A = 0.1\% \text{ TSI}$



Результаты экспериментов:

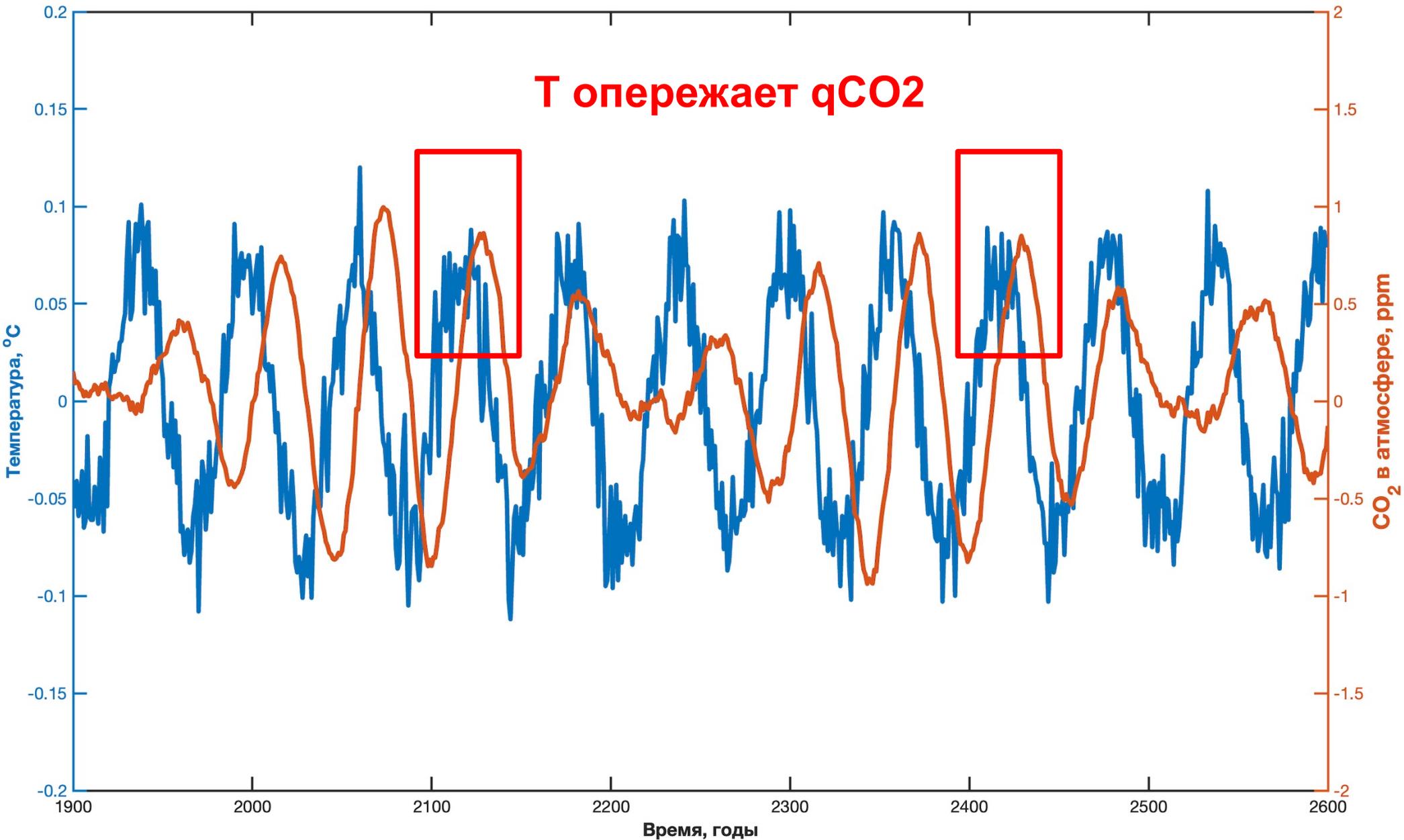
сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.1$ ГтС/год

$N_A = 0.1\%$ TSI

Т опережает qCO2



Результаты экспериментов:

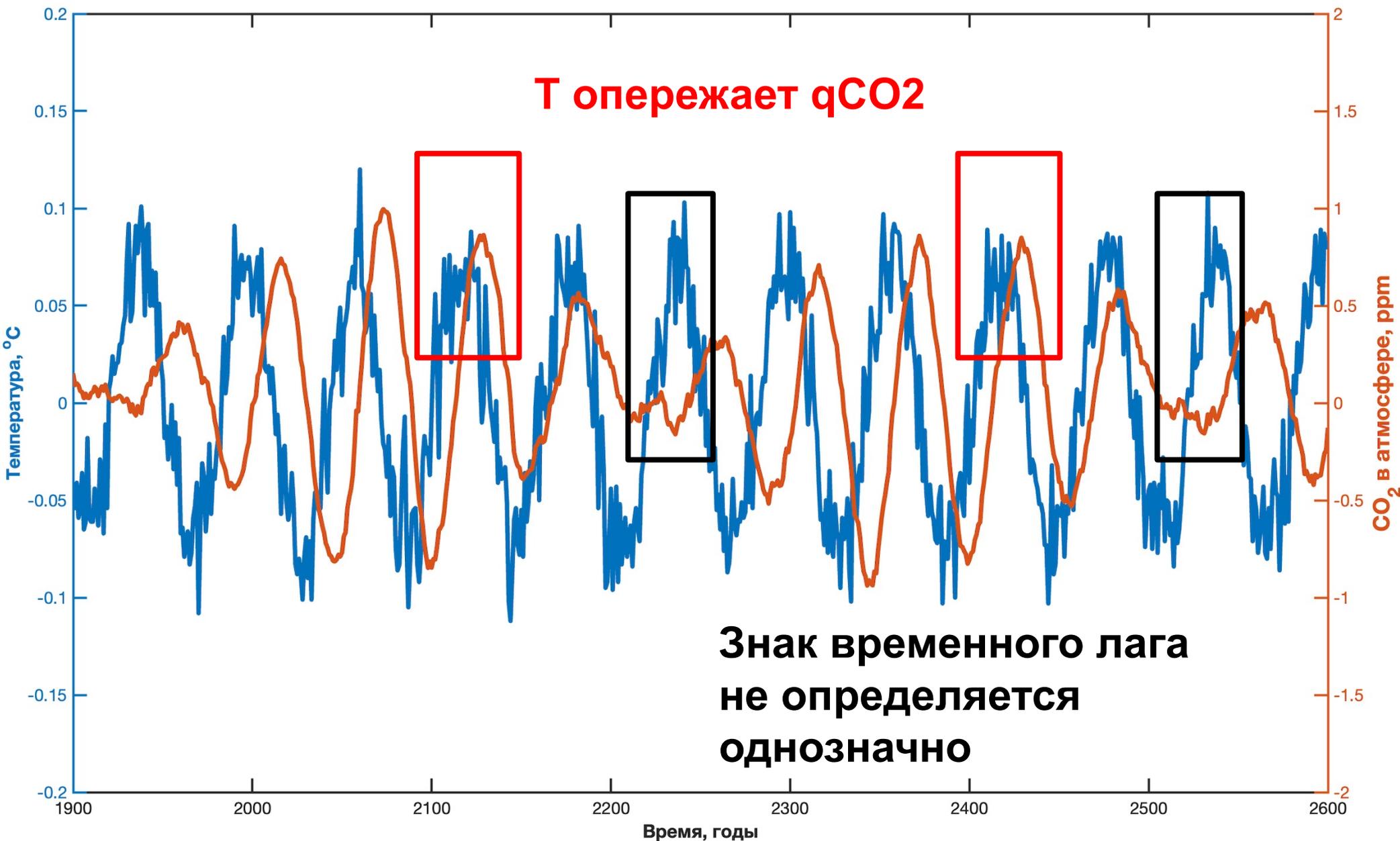
сценарий SSP1-2.6

+

Вариации $E_A = 0.1$ ГтС/год

$N_A = 0.1\%$ TSI

Т опережает qCO_2



Интерпретация результатов

Полученные результаты могут быть воспроизведены в системе из двух линейных дифференциальных уравнений, описывающих изменения T и q :

$$\frac{dT}{dt} = R(q - q_0) - \lambda(T - T_0) + N_v(t)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta(q - q_0) + \gamma(T - T_0) + E_v(t)$$

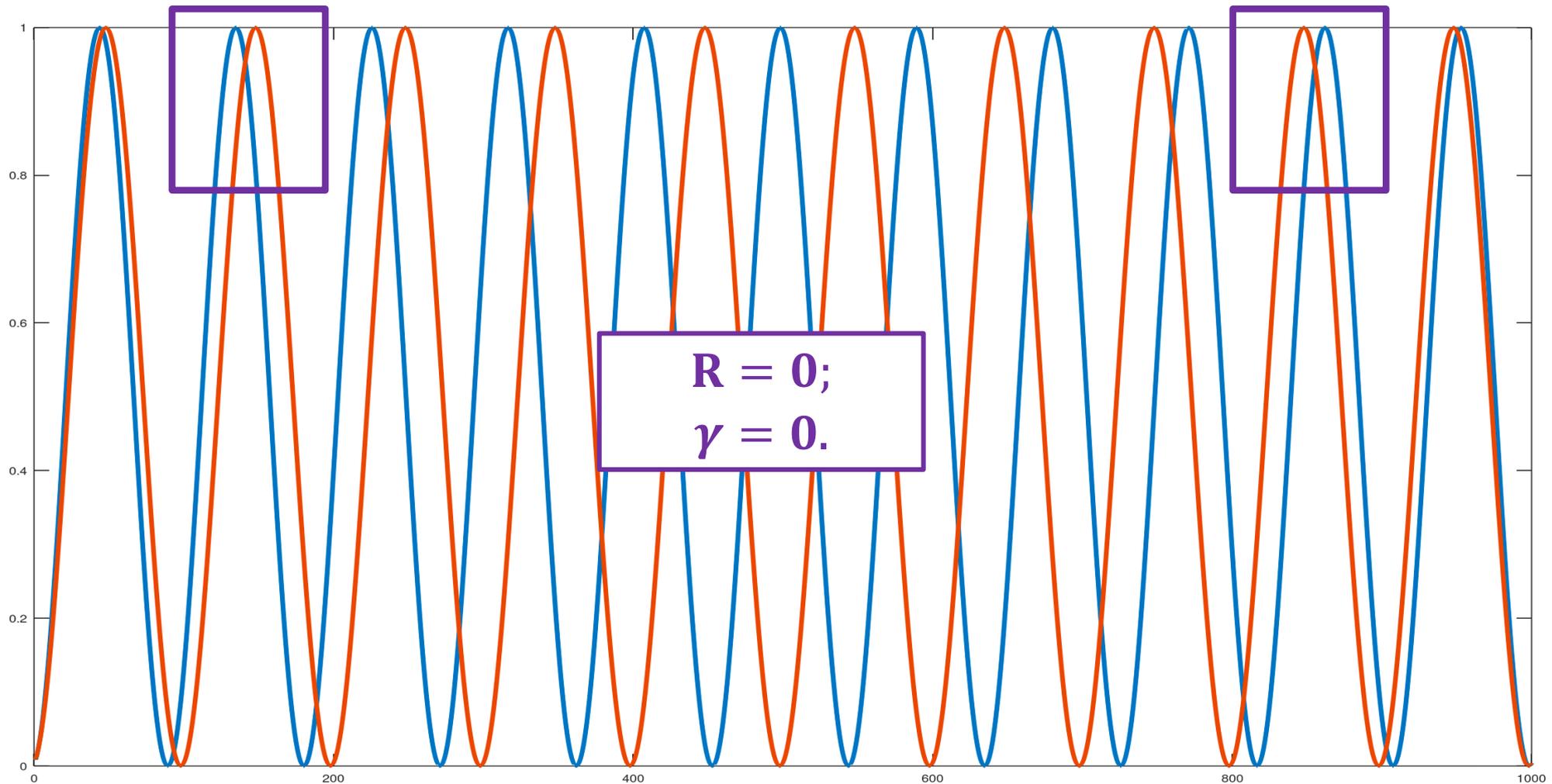
Интерпретация результатов

$$\frac{dT}{dt} = R(q - q_0) - \lambda(T - T_0) + N_v(t)$$

$$N_v = F_0 \sin(\omega t)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta(q - q_0) + \gamma(T - T_0) + E_v(t)$$

$$E_v = E_0 \sin(\Omega t),$$
$$\Omega = 1.1 \omega$$



Интерпретация результатов

$$\frac{dT}{dt} = R(q - q_0) - \lambda(T - T_0) + N_v(t)$$

$$N_v = F_0 \sin(\omega t)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta(q - q_0) + \gamma(T - T_0) + E_v(t)$$

$$E_v = E_0 \sin(\Omega t),$$
$$\Omega = 1.1 \omega$$



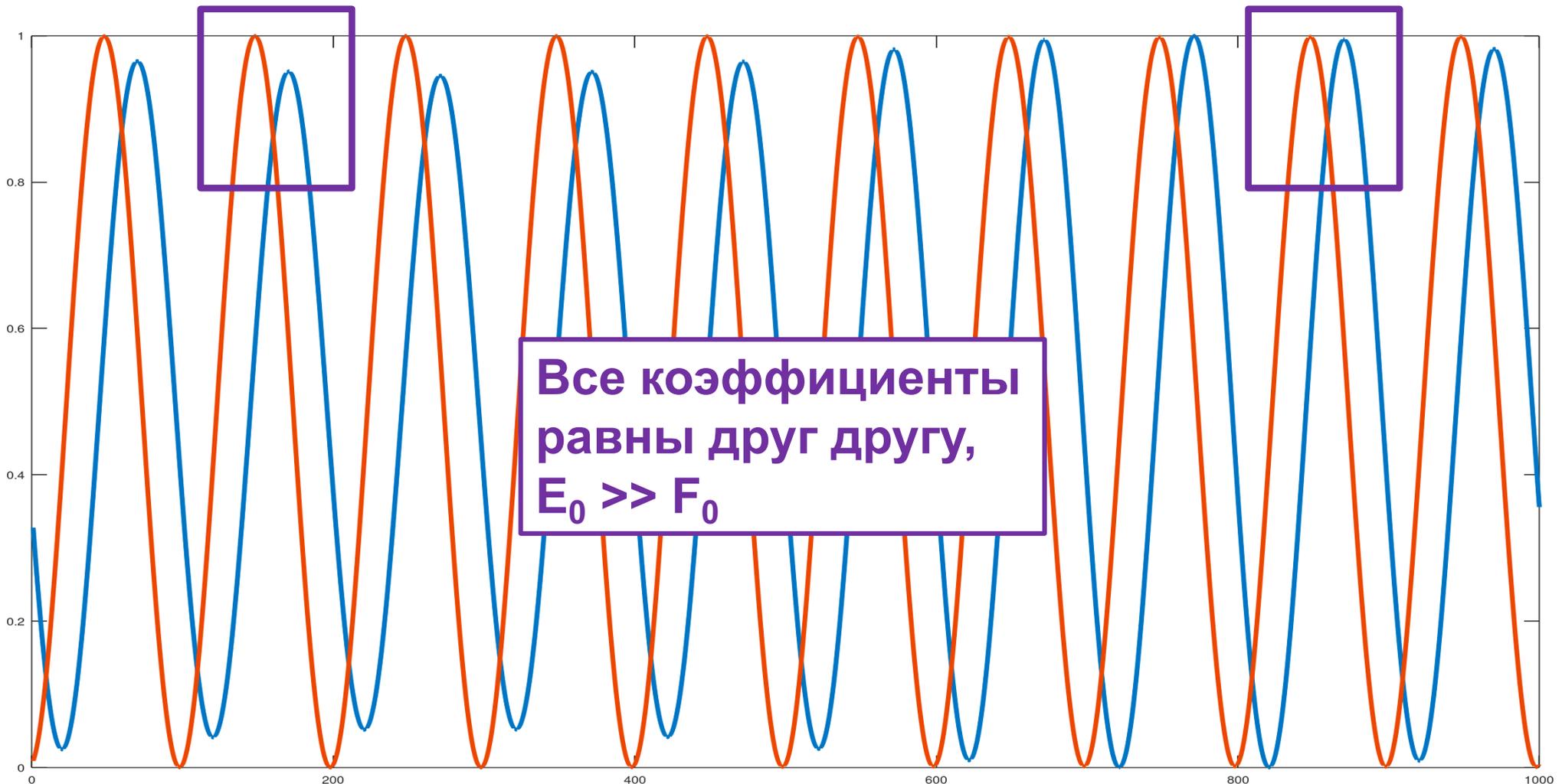
Интерпретация результатов

$$\frac{dT}{dt} = R(q - q_0) - \lambda(T - T_0) + N_v(t)$$

$$N_v = F_0 \sin(\omega t)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta(q - q_0) + \gamma(T - T_0) + E_v(t)$$

$$E_v = E_0 \sin(\Omega t),$$
$$\Omega = 1.1 \omega$$



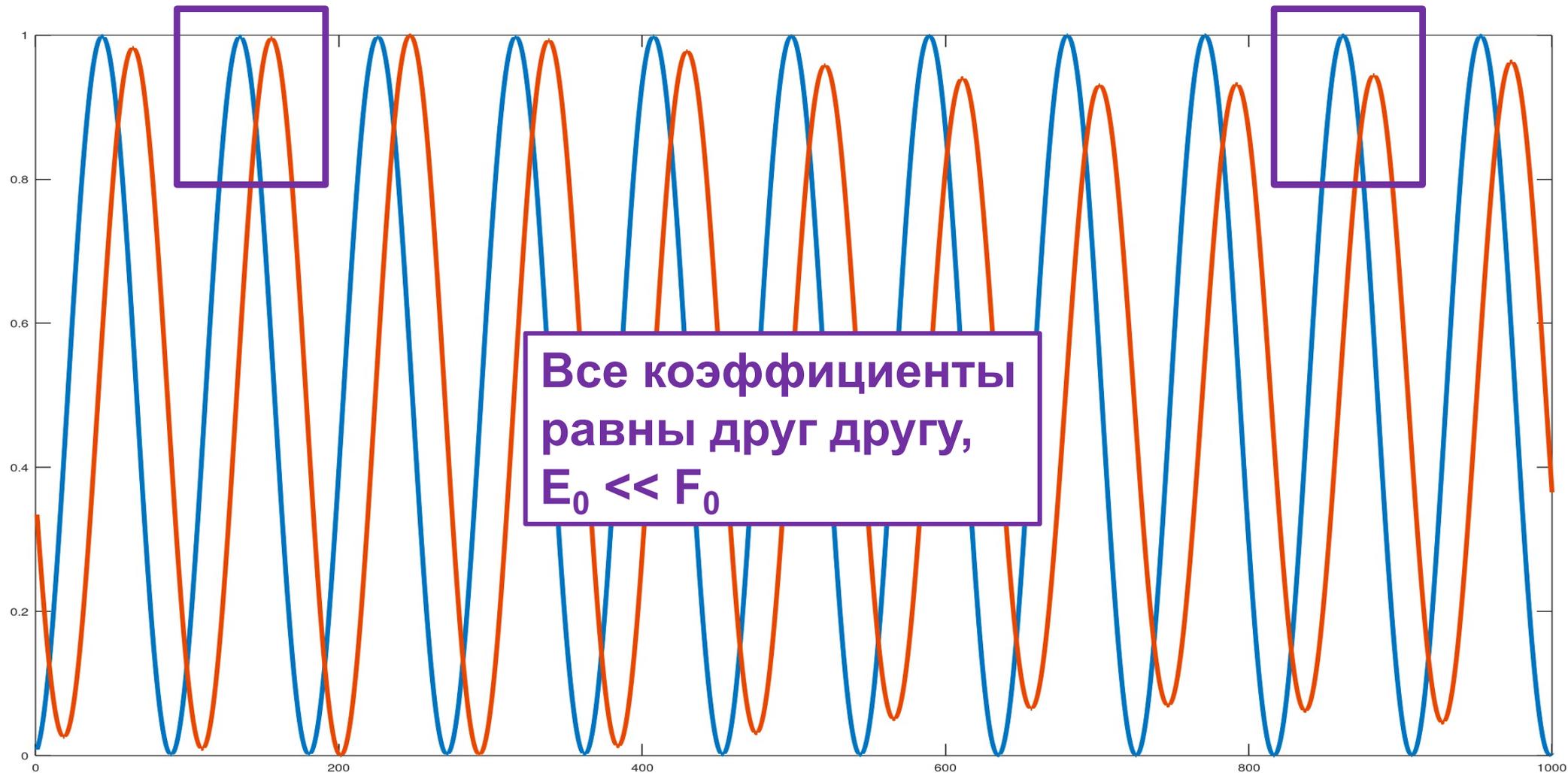
Интерпретация результатов

$$\frac{dT}{dt} = R(q - q_0) - \lambda(T - T_0) + N_v(t)$$

$$N_v = F_0 \sin(\omega t)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\beta(q - q_0) + \gamma(T - T_0) + E_v(t)$$

$$E_v = E_0 \sin(\Omega t),$$
$$\Omega = 1.1 \omega$$



ВЫВОДЫ

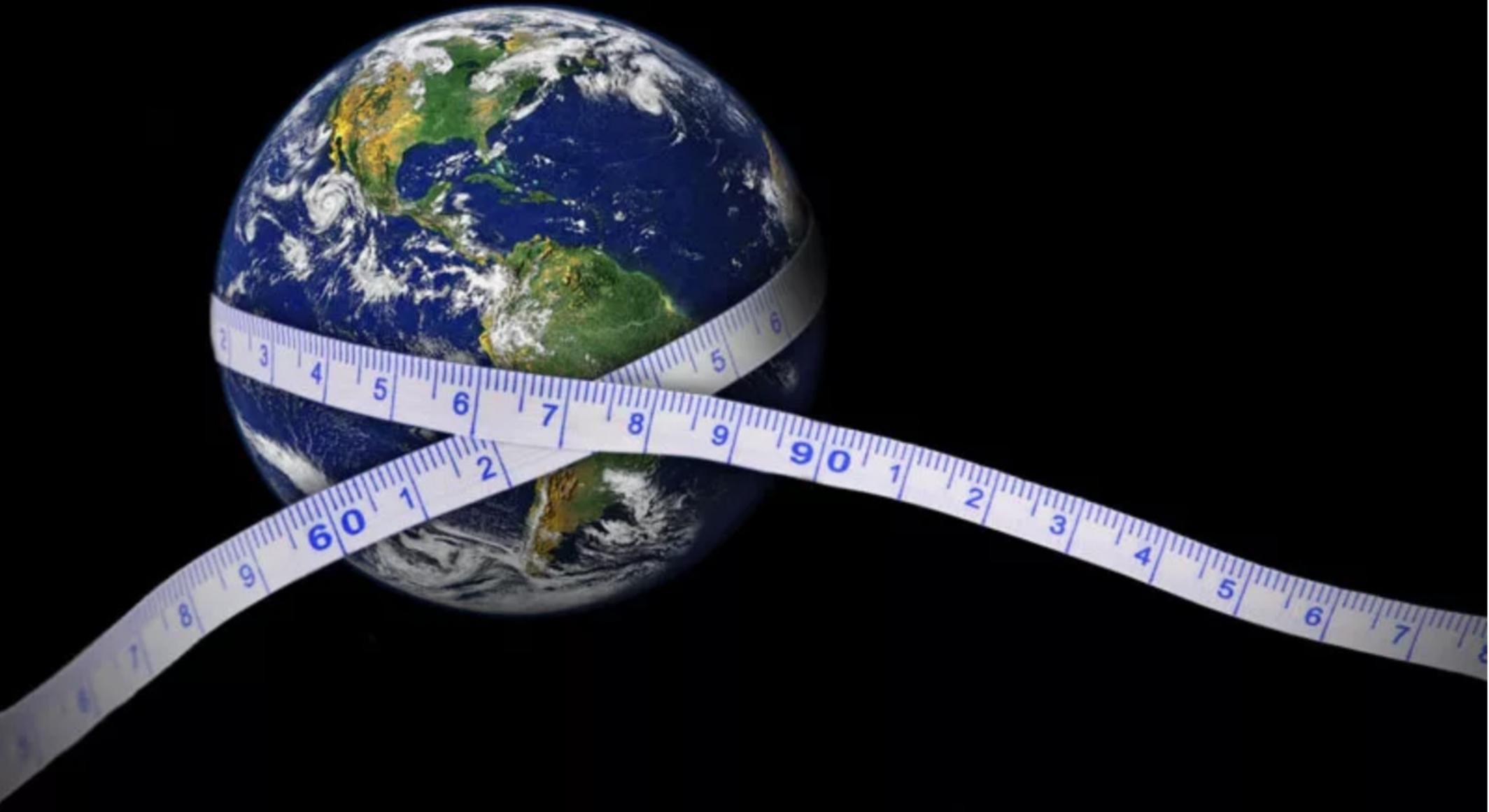
При комбинированном воздействии на Земную систему, включающем в себя несколько периодических компонент с близкими временными масштабами (напр., эмиссии CO₂ и естественная изменчивость) **знак временного лага Δ** между изменениями глобальной температуры **T** и содержания CO₂ в атмосфере **qCO₂** может меняться в зависимости от времени при неизменном типе и временном масштабе внешних воздействий.

Возникновение этого эффекта зависит от **соотношения амплитуд** внешних воздействий:

- Если амплитуды обоих воздействий достаточно велики (вызывают сопоставимые друг с другом изменения), то эффект проявляется.
- Если одно из воздействий вызывает существенно больший отклик, чем другое, эффект не проявляется.

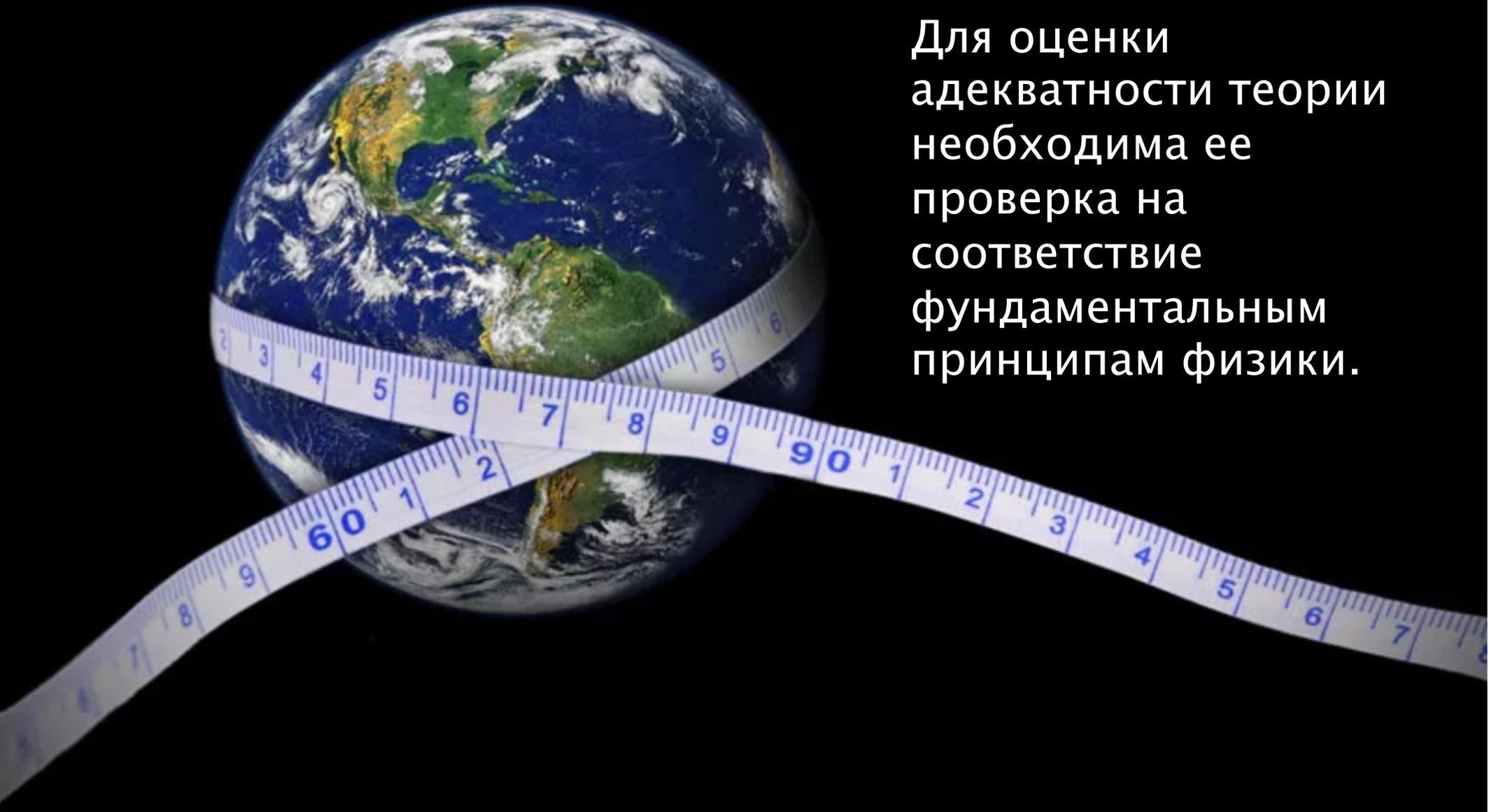
Методологическая проблема:

С Земной системой как целым невозможно поставить эксперимент.



Методологическая проблема:

С Земной системой как целым невозможно поставить эксперимент.



Для оценки адекватности теории необходима ее проверка на соответствие фундаментальным принципам физики.

Принцип причинности

В числе прочего используется принцип причинности, означающий, что событие–причина предшествует по времени событию–следствию.

На практике это означает попытку рассмотреть ряды данных для климатических переменных и определить характер причинно–следственной связи между ними по форме этих рядов без привлечения каких бы то ни было представлений о природе их взаимодействия.

Принцип причинности

В частности, выводы о характере причинно-следственных связей между климатическими переменными иногда делаются на основании временного лага между рядами данных для этих переменных в предположении, что изменения переменной с "запаздывающим" рядом не могут быть причиной изменений переменной с "опережающим".

В частности, это относится к рядам данных для глобальной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q .

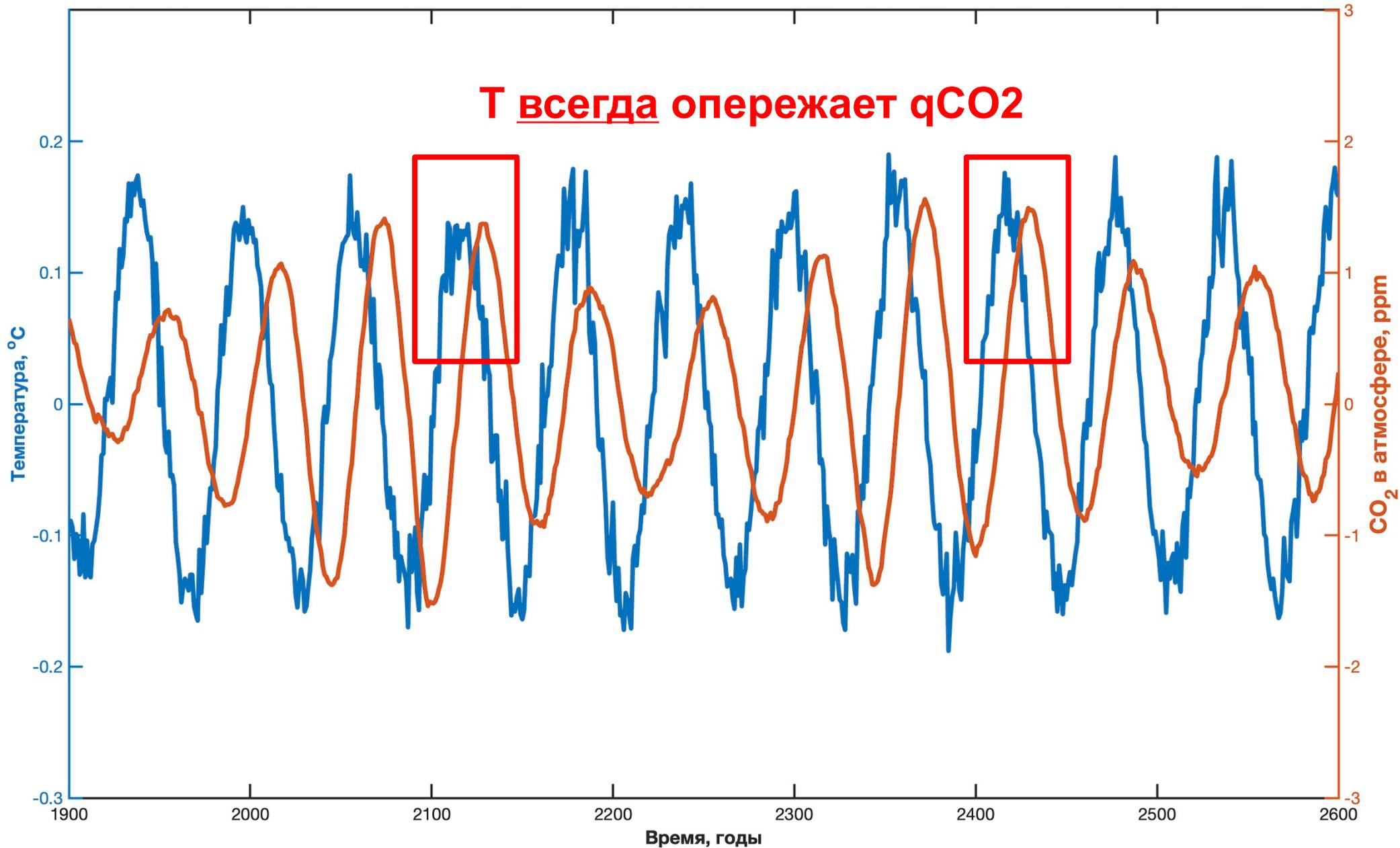
Результаты экспериментов:

сценарий SSP1-2.6

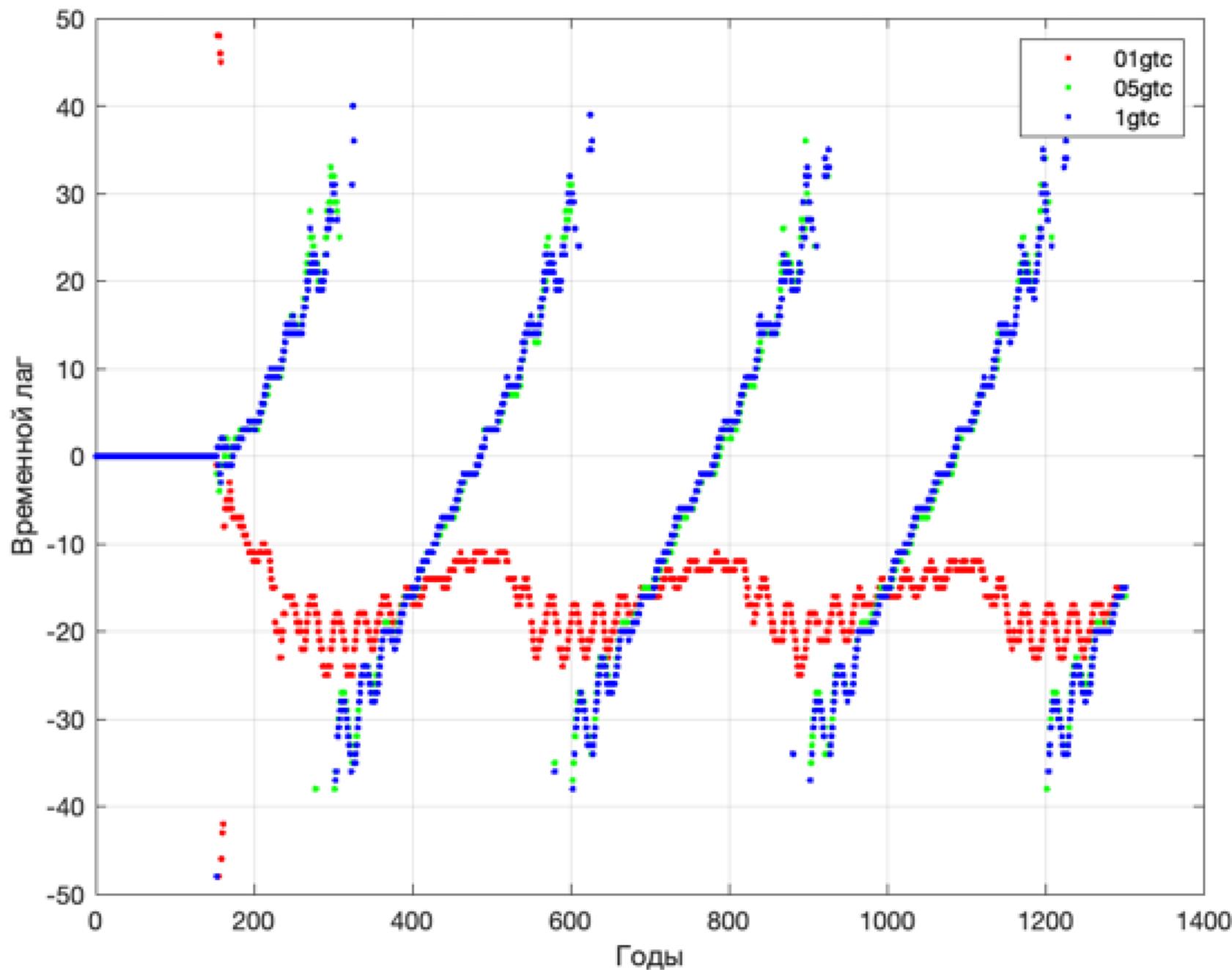
+

Вариации $E_A = 0.1$ ГтС/год

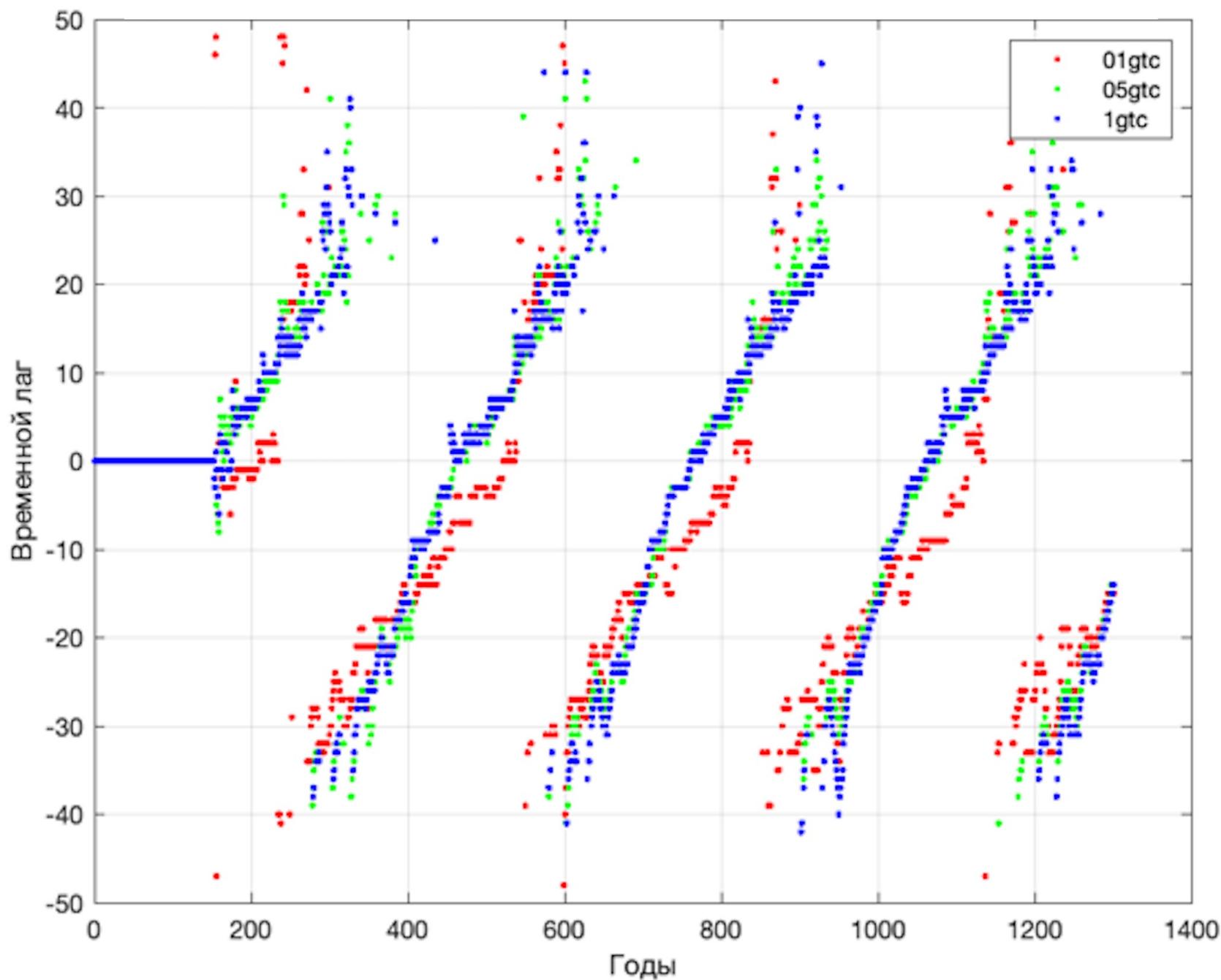
$N_A = 0.5\%$ TSI



Временной лаг между T и q в скользящем окне 50 лет при $N_A = 0.5\% \text{ TSI}$



Временной лаг между T и q в скользящем окне 50 лет при $N_A = 0.05\% TSI$



Численные эксперименты

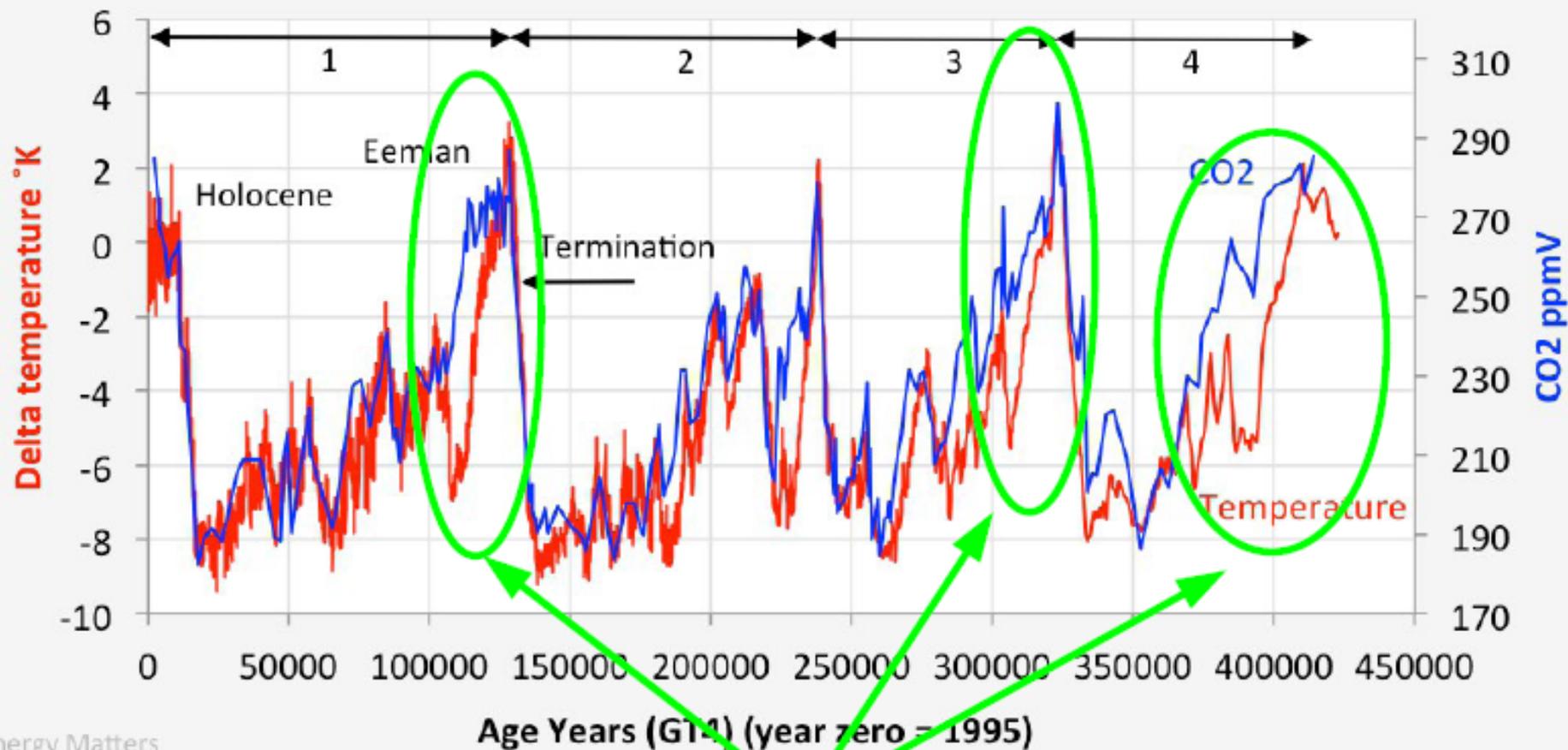
С климатической моделью ИФА РАН поставлены численные эксперименты по оценке изменений климата в 2020-3000 гг. при комбинированном внешнем воздействии на Земную систему, включающем в себя:

- 1) антропогенные эмиссии CO_2 в атмосферу (E);
- 2) знакопеременный поток энергии в поверхностный слой океана и деятельный слой суши, соответствующий естественной изменчивости климата (F).

Эмиссии CO_2 (E) задавались в соответствие со сценарием SSP1-2.6, продолженным до 3000 г. и дополненным синусоидальными вариациями с амплитудами {0.1, 0.5, 1.0} ГтС/год и периодом 50 лет, соответствующим среднему значению периода экономических циклов Кондратьева.

Поток энергии F задавался в виде синусоидальной функции с периодом 60 лет, характерным для естественной изменчивости климата, и амплитудами {0.05%, 0.1%, 0.25%, 0.5%} от значения солнечной постоянной 1366.09 Вт/м².

Vostok Ice Core: Temperature and CO2

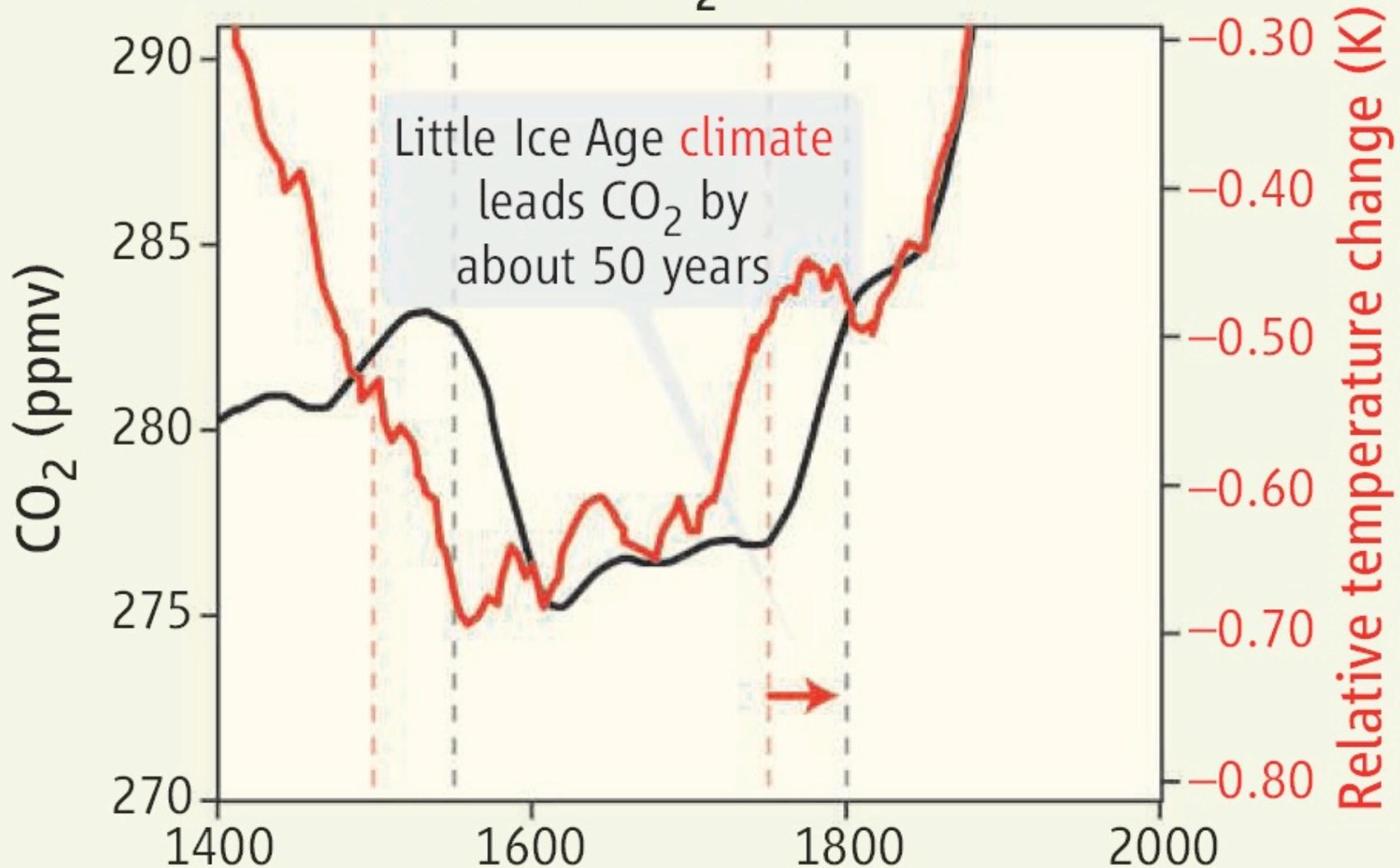


Energy Matters
euanmearns.com

<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok>

T опережает ρ_{CO_2} на
несколько столетий

Climate and CO₂ data from LIA



Временной лаг между T и qCO₂ в «Малый ледниковый период»
[Cox, Jones, 2008]

Межгодовые инкременты глобальной температуры и q_{CO_2} для XX века [Hunlum et al., 2013]

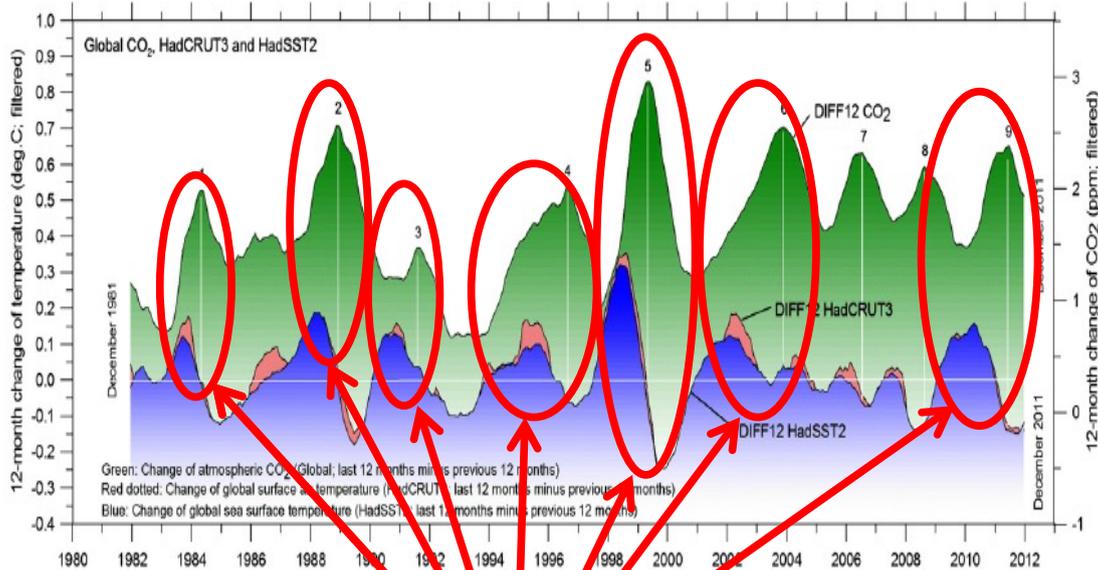


Fig. 2. 12-month change of global atmospheric CO₂ concentration (NOAA; green), global sea surface temperature (HadSST2; blue) and global surface air temperature (HadCRUT3; red dotted). The upper panel shows unfiltered monthly values (e.g. January 2000 minus January 1999), while the lower panel shows filtered values (DIFF12, the difference between the average of the last 12 months and the average for the previous 12 months for each data series). The numbers (1–9) on DIFF12 CO₂ peaks and the thin white lines refer to Table 1.

Температура опережает q_{CO_2} на 10 месяцев

Межгодовые инкременты глобальной температуры и q_{CO_2} для XX века [Hunlum et al., 2013]

На основании этих данных порой утверждается:

1. Наблюдаемое потепление не связано с антропогенным увеличением q_{CO_2} .
2. Климатические модели, которые связывают это потепление с антропогенным парниковым эффектом, неправильны.

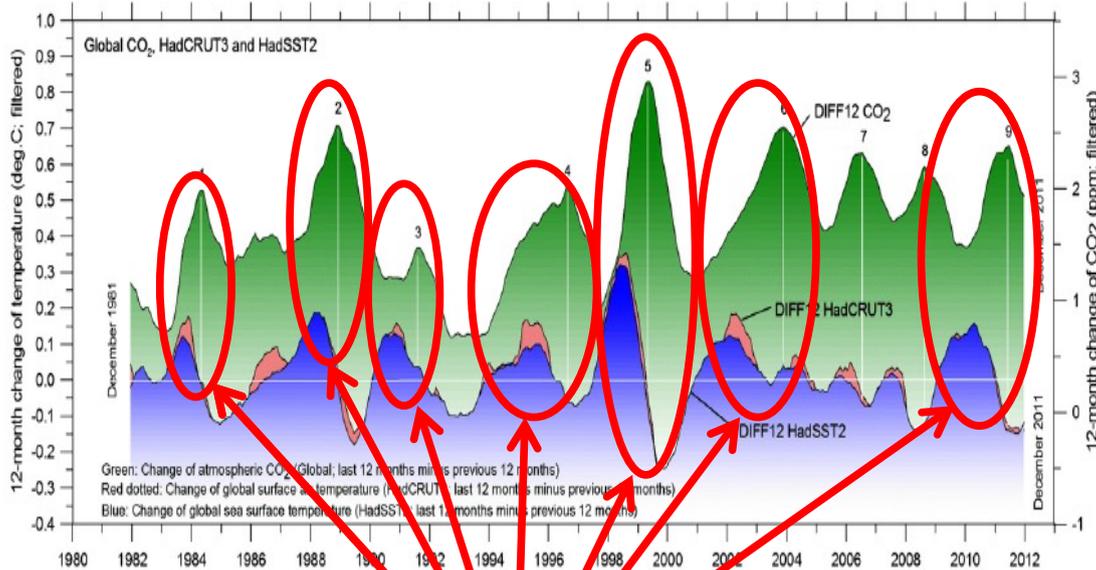


Fig. 2. 12-month change of global atmospheric CO₂ concentration (NOAA; green), global sea surface temperature (HadSST2; blue) and global surface air temperature (HadCRUT3; red dotted). The upper panel shows unfiltered monthly values (e.g. January 2000 minus January 1999), while the lower panel shows filtered values (DIFF12, the difference between the average of the last 12 months and the average for the previous 12 months for each data series). The numbers (1–9) on DIFF12 CO₂ peaks and the thin white lines refer to Table 1.

Температура опережает q_{CO_2} на 10 месяцев

Указанные аргументы критиковались с различных точек зрения, но сама идея о том, что по временному лагу между изменениями переменных можно судить о причинно-следственной связи между ними, в рамках этой критики не подвергалась сомнению.

Однако, очевидно, что **ряды данных** для климатических переменных не являются **элементарными событиями**, так что

принцип причинности в его простейшей интерпретации к ним, вообще говоря, неприменим.

Расчет временного лага:

Временному лагу Δ , определенному таким образом, соответствует вычисляемая аналитически фазовая задержка между функциями $q(t)$ и $T(t)$:

Внешнее воздействие на Земную систему:

$$F = F_A \sin(\omega t)$$

Аналитические решения для q и T :

$$\begin{aligned} T &= T_A \sin(\omega t + \varphi_T) \\ q &= q_A \sin(\omega t + \varphi_q) \end{aligned}$$

Фазовая задержка Δ :

$$\Delta = \frac{\varphi_T - \varphi_q}{\omega}$$

ВЫВОДЫ

- Современные климатические модели способны на качественном и количественном уровне воспроизводить отмечаемую по данным наблюдений задержку Δ между изменениями глобальной приповерхностной температуры T и содержания CO_2 в атмосфере q , причем в экспериментах, предполагающих, что общий рост T обусловлен ростом q .
- Существование подобной задержки не является аргументом против антропогенной теории глобального потепления, на которой основаны современные модели.
- Этот результат не противоречит принципу причинности, т.к. последний справедлив для событий, а не рядов данных: фазовый сдвиг между рядами данных не равнозначен запаздыванию между событиями.
- Этот пример иллюстрирует, что невозможно установить направление причинно-следственной связи между климатическими переменными на основании характеристик рядов данных для них, не привлекая никакой информации о природе их взаимодействия.