

# Вариации концентрации радиоуглерода и газообмен атмосфера—океан

А.В. Бялко

*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау,  
журнал «Природа»*

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2013, том 451, № 1, с. 28–31

# Академик Андрей Дмитриевич Сахаров:

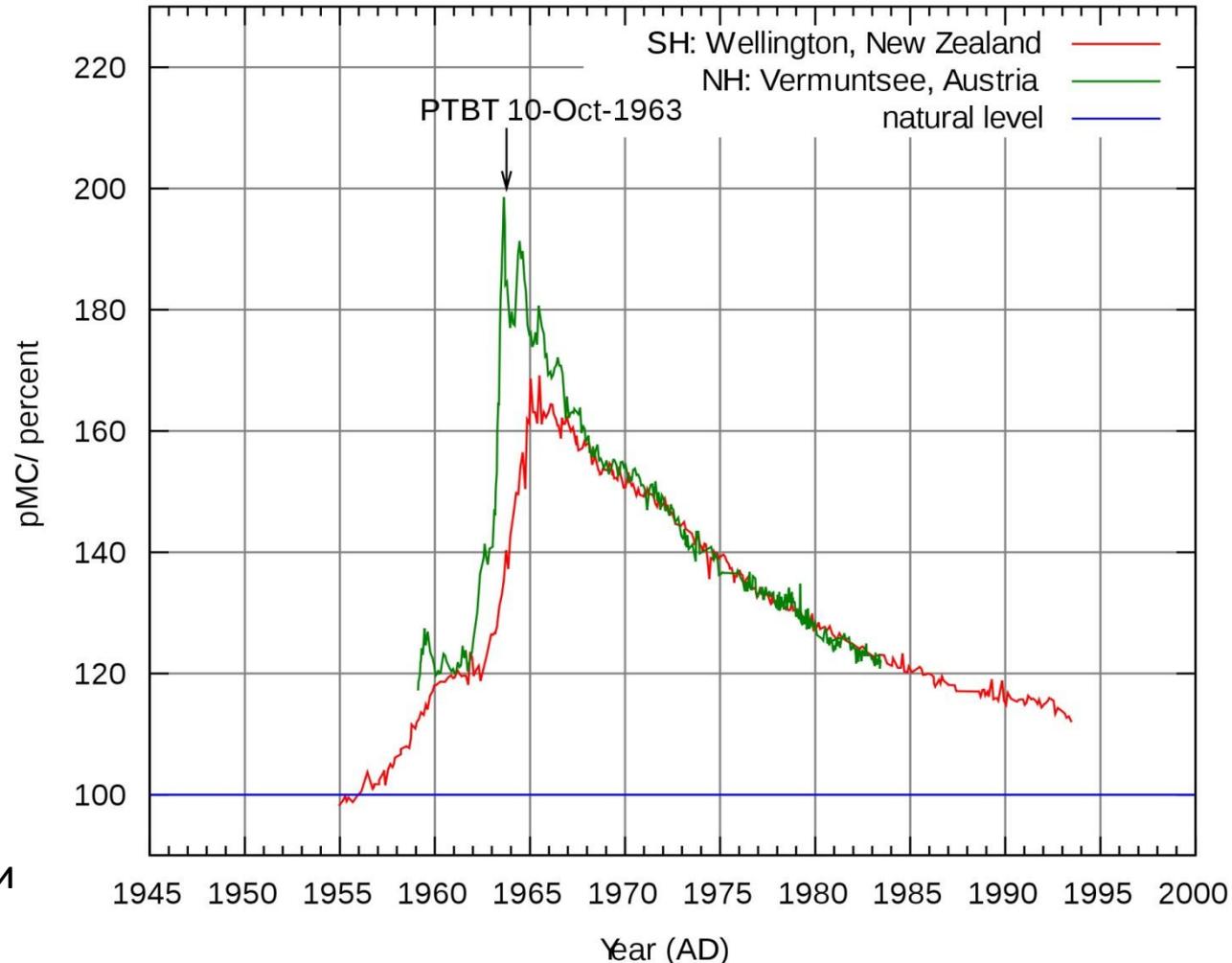
«Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты»  
*Атомная энергия*, т. 4, № 6, 1958.

«Общее число жертв радиоуглерода мегатонного взрыва составит 6 600 человек. Эти жертвы распределяются на срок порядка 8 тыс. лет.»

# Академик Андрей Дмитриевич Сахаров:

«Радиоактивный углерод ядерных взрывов и непороговые биологические эффекты»  
*Атомная энергия*, т. 4, № 6, 1958.

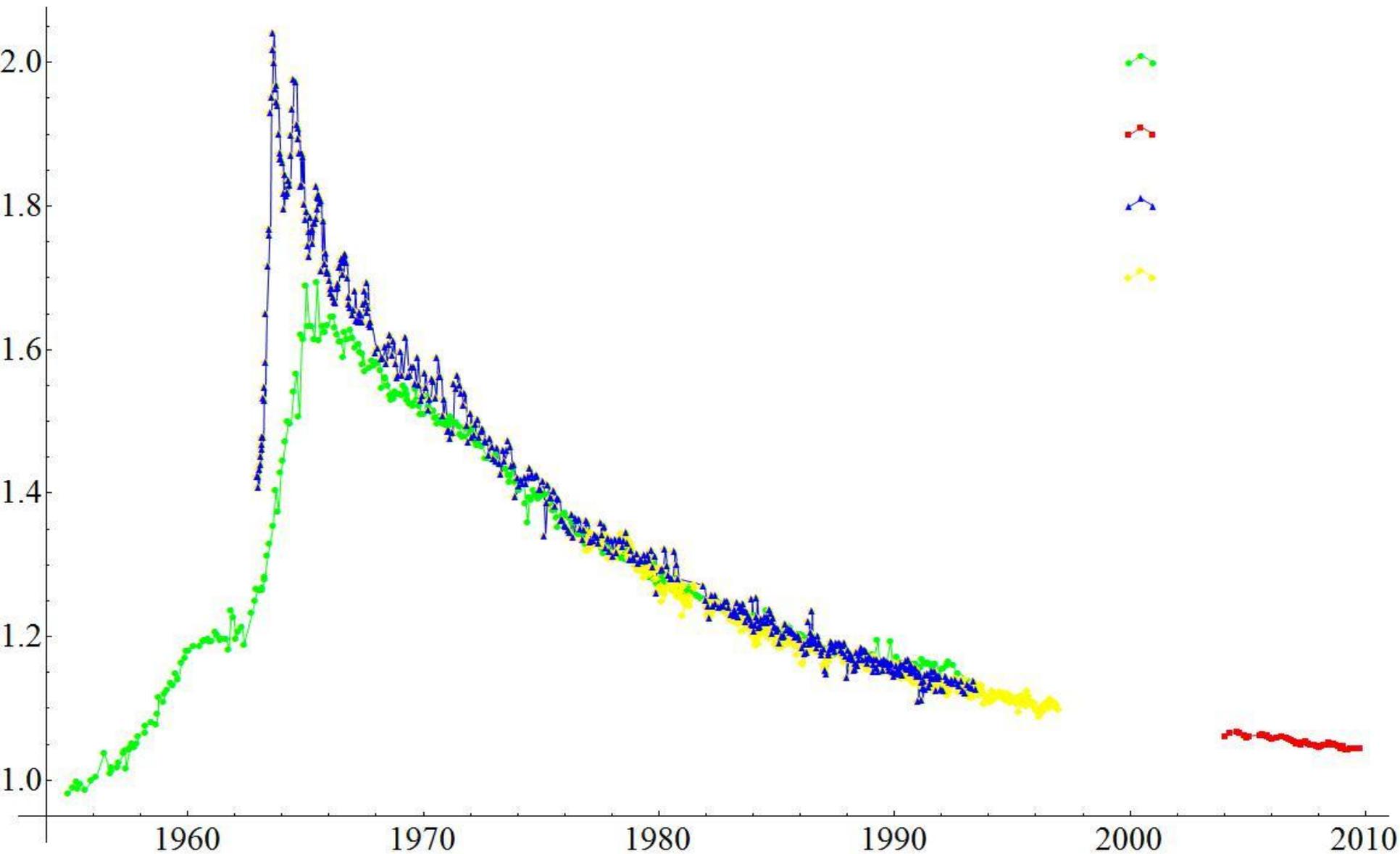
«Общее число жертв радиоуглерода мегатонного взрыва составит 6 600 человек. Эти жертвы распределяются на срок порядка 8 тыс. лет.»



Почему так быстро спадает?

- 1) Растворяется в океане;
- 2) Разбавляется при сжигании ископаемых топлив

# Концентрация $^{14}\text{C}$ в атмосфере по отношению к стандарту 1950 г.



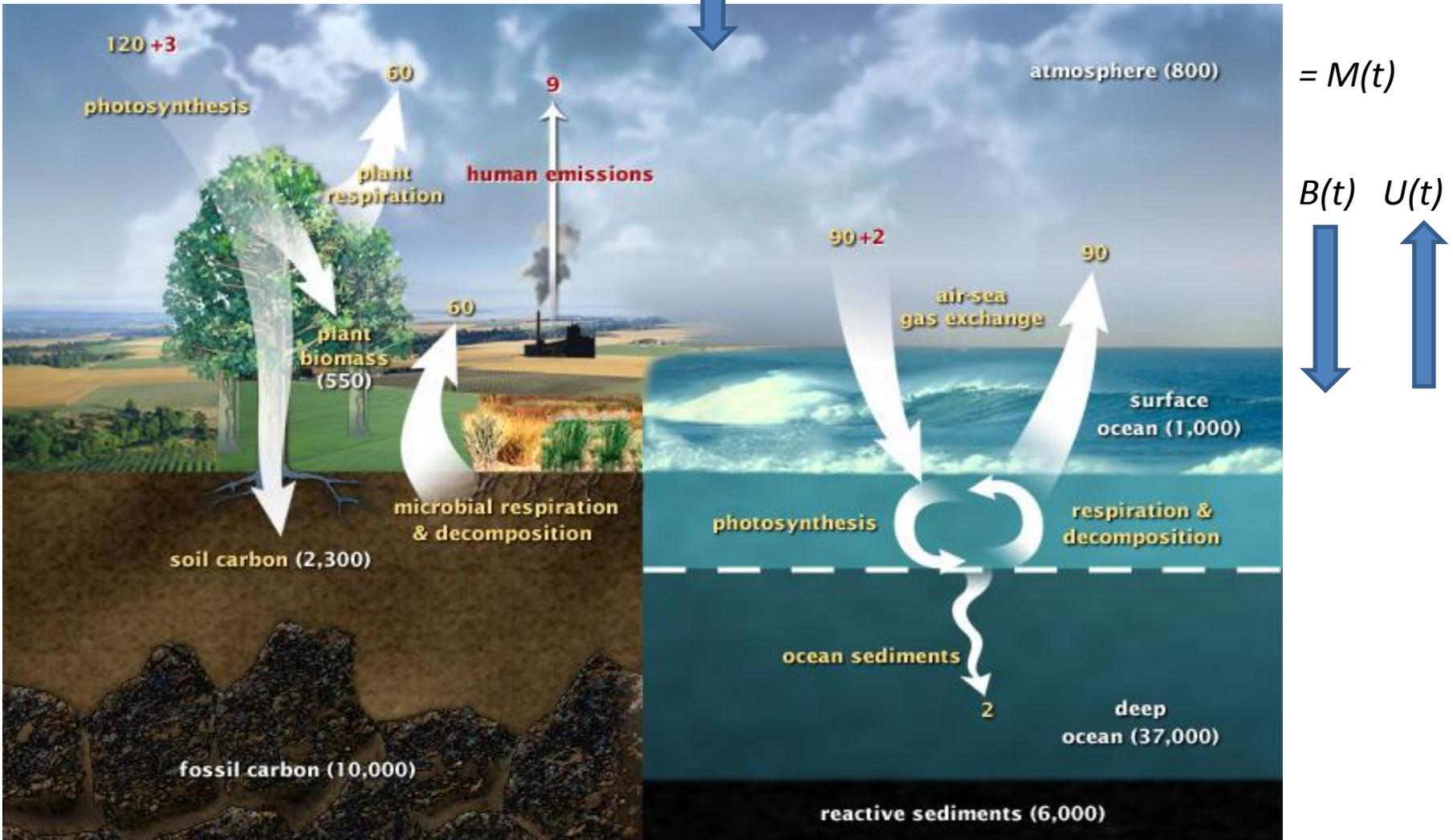
# Газообмен

CO<sub>2</sub> и <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> между атмосферой и резервуарами углерода в океане и на суше

Космическое излучение  $C(t)$ :



Распад:



$M$  – масса С атмосферы,  $M_i$  –  $i$ -го резервуара С.

$R$  – поток С в атмосферу от сжигания топлив;

$U_i$  – поток из  $i$ -го резервуара в атмосферу;

$B_i$  – поток из атмосферы в  $i$ -й резервуар.

$$\dot{M} = R + \sum_i (U_i - B_i); \quad \dot{M}_i = -B_i + U_i.$$

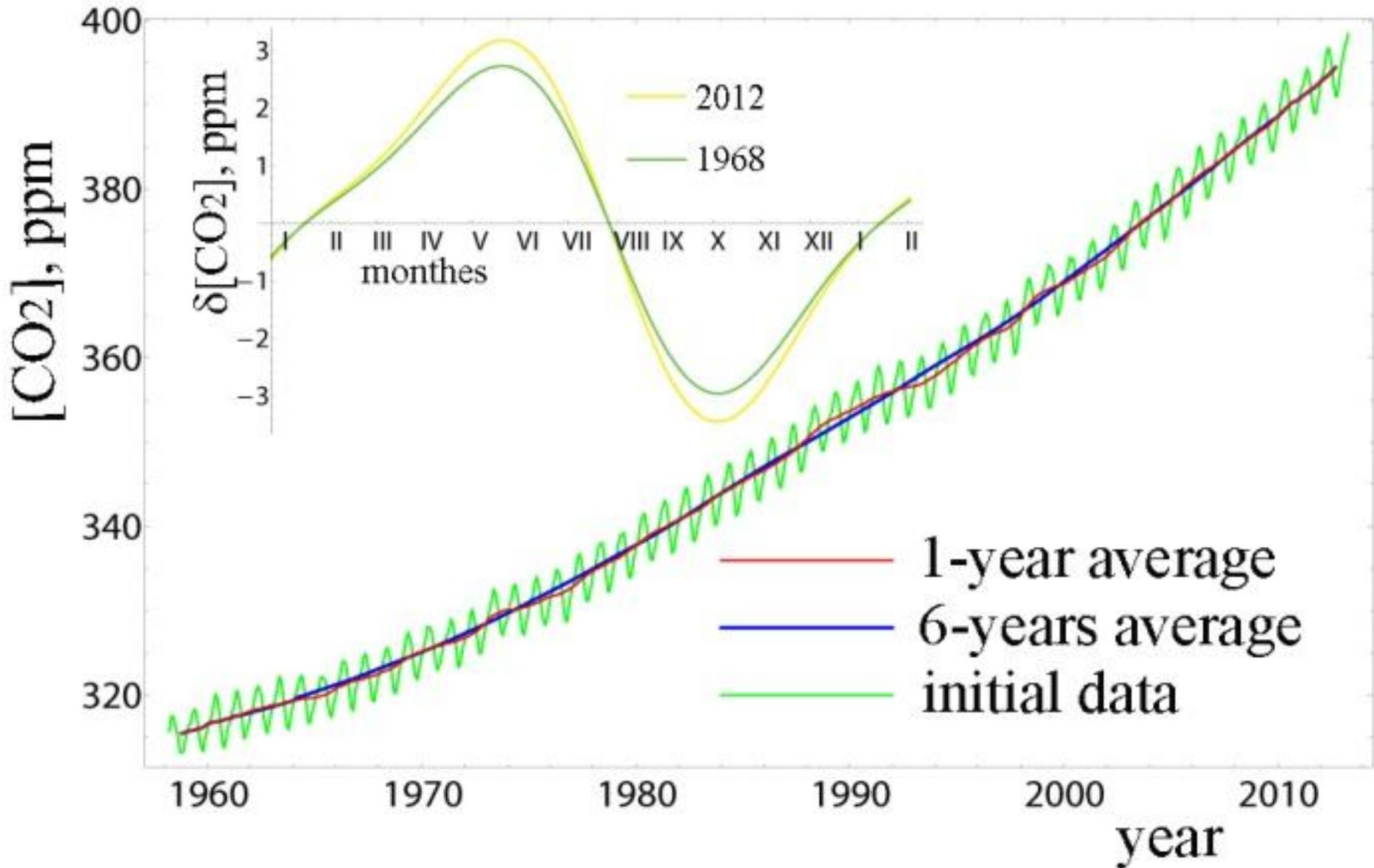
$M(t)$  и  $R(t)$  известны. Остальные потоки не знаем.

Введем также параметры релаксации:

$$u_i(t) = \frac{U_i}{M}; \quad b_i(t) = \frac{B_i}{M_i}; \quad r(t) = \frac{R}{M}.$$

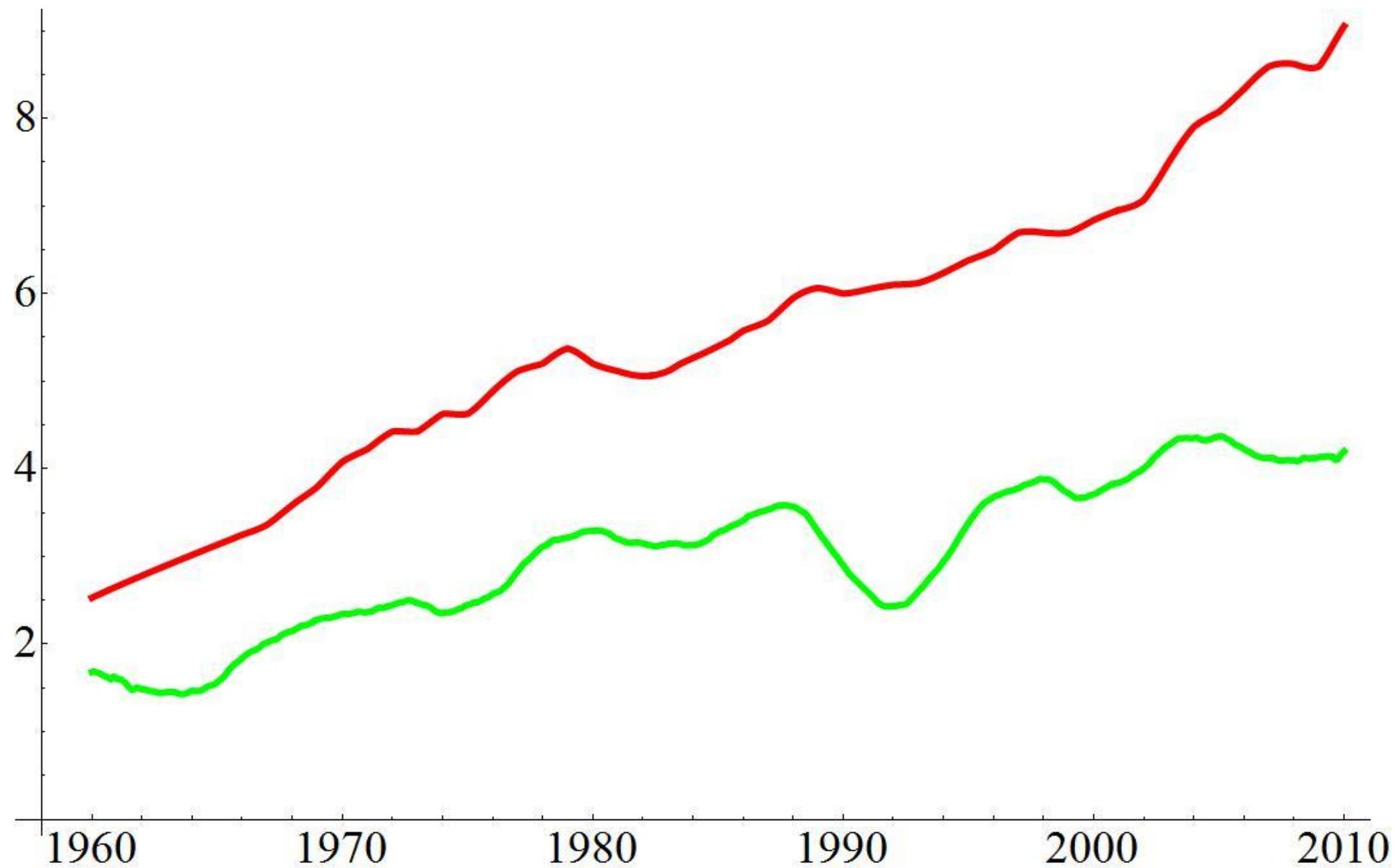
Их размерность – обратное время.

# Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере в частях на миллион (ppm)



$R(t)$  – поступление С от ископаемых топлив (красная)

$dM/dt$  – производная массы С в атмосфере (обе: ПгС/год);



$N$  – масса  $^{14}\text{C}$  в атмосфере;  $N_i$  –  $i$ -го резервуара  $^{14}\text{C}$ .

$C$  – космическая генерация  $^{14}\text{C}$ ;  $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$  – распад.

$k = N/M$  – доля  $^{14}\text{C}$  атмосферы;  $f \approx 0.95$  – фракционирование

$k_i = N_i/M_i$  – доля  $^{14}\text{C}$  в  $i$ -ом резервуаре.

$$\dot{N} = \sum_i (f_i k_i U_i - k B_i) + C - \lambda N;$$

$$\dot{N}_i = -f_i k_i U_i + k B_i - \lambda N_i.$$

Или:

$$\dot{k} = c - \lambda k - kr - \sum_i (k - f_i k_i) u_i;$$

$$c(t) = \frac{C}{M}.$$

$$\dot{k}_i = -\lambda k_i + (k - f_i k_i) b_i$$

Объединим резервуары поверхностных вод океана и биомассы суши, поскольку среднее время нахождения углерода в древесной массе и болотах того же порядка величины (50—80 лет), что и времена релаксации газообмена океана. Существенно больше характерные времена синтеза и распада радиоуглерода, а также время оборота Великого Конвейера. Как будет подтверждено результатами, на временном отрезке в 60 лет можно пренебречь медленными процессами по сравнению с газообменом атмосферы:

$$u_1 \sim b_1 \gg \lambda \sim u_2 \sim b_2.$$

Здесь в качестве первого резервуара углерода рассматривается биомасса суши и  $\text{CO}_2$ , растворенный в поверхностных водах, а в качестве второго – глубинные воды Конвейера

# Система уравнений для концентраций $^{14}\text{C}$ в атмосфере и поверхностном слое океана

$$\dot{k} = u(fk_1 - k) - kr; \quad \dot{k}_1 = (k - fk_1)b.$$

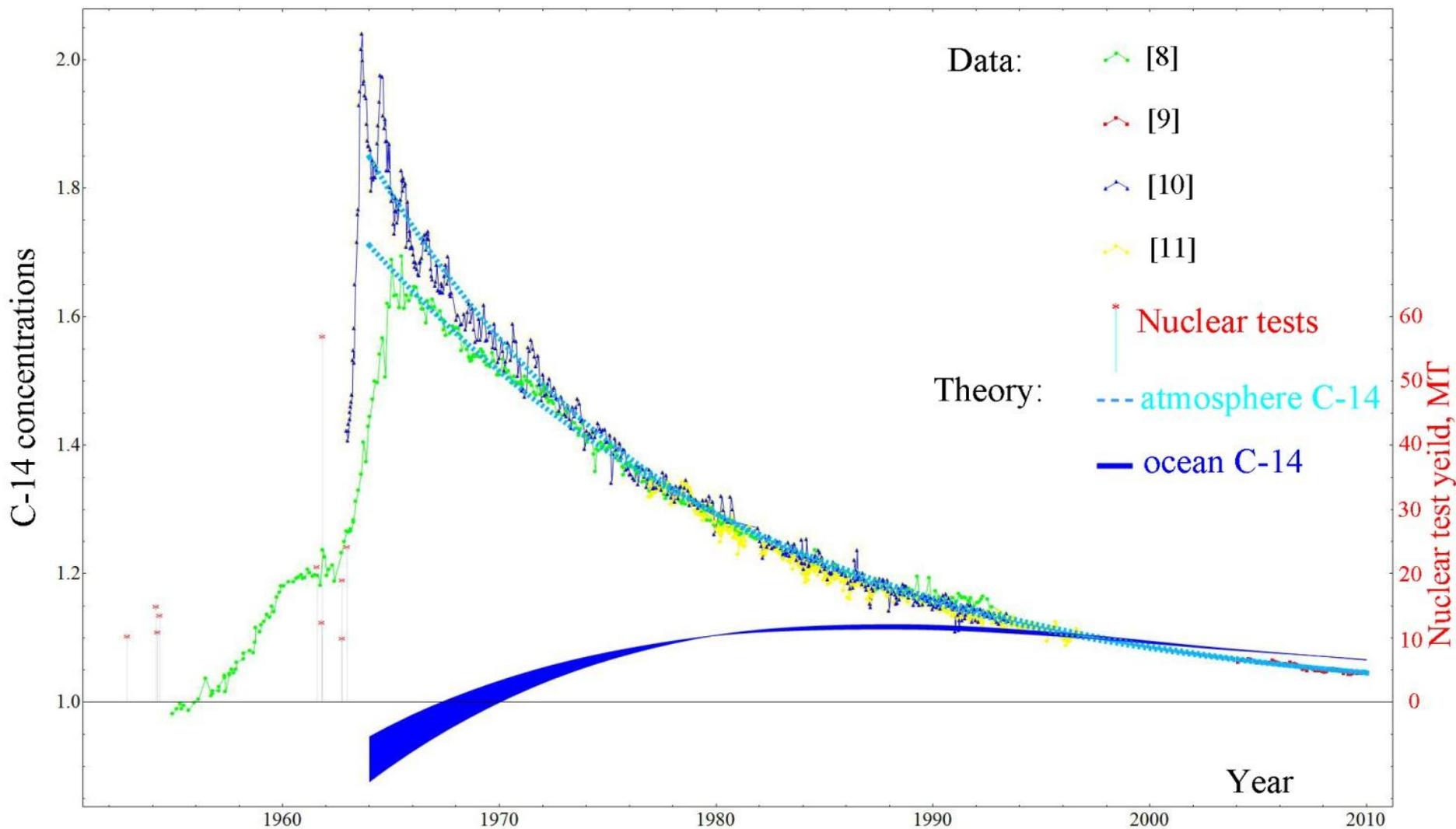
Подстановка:  $w = \frac{k_1}{fk}$ ;

$$\dot{w} = wr + (fb + wu)(1 - w).$$

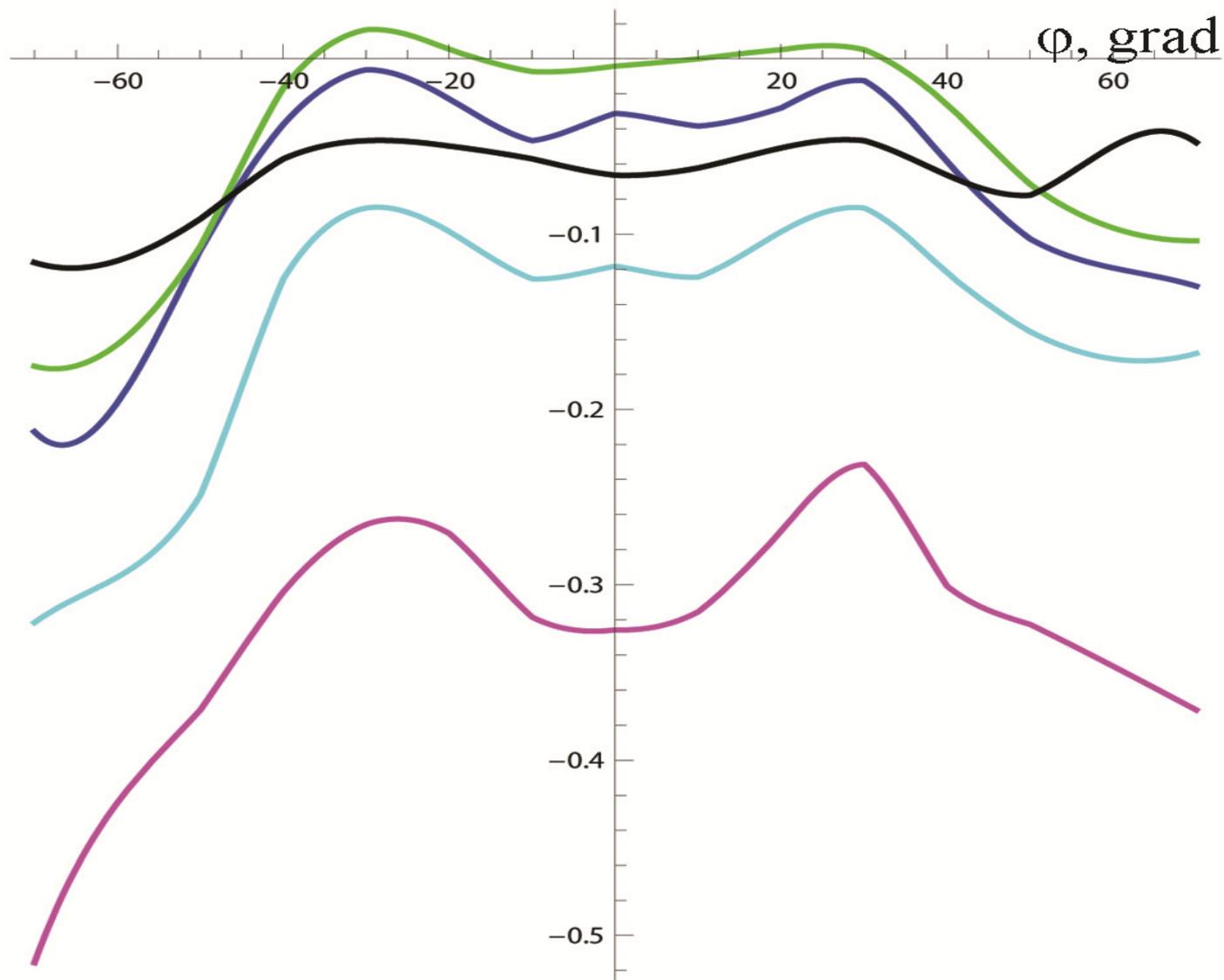
Начальное условие :  $w(t_0) = 1$

Задача: по известной зависимости  $k(t)$  найти функции  $u(t), b(t)$ .

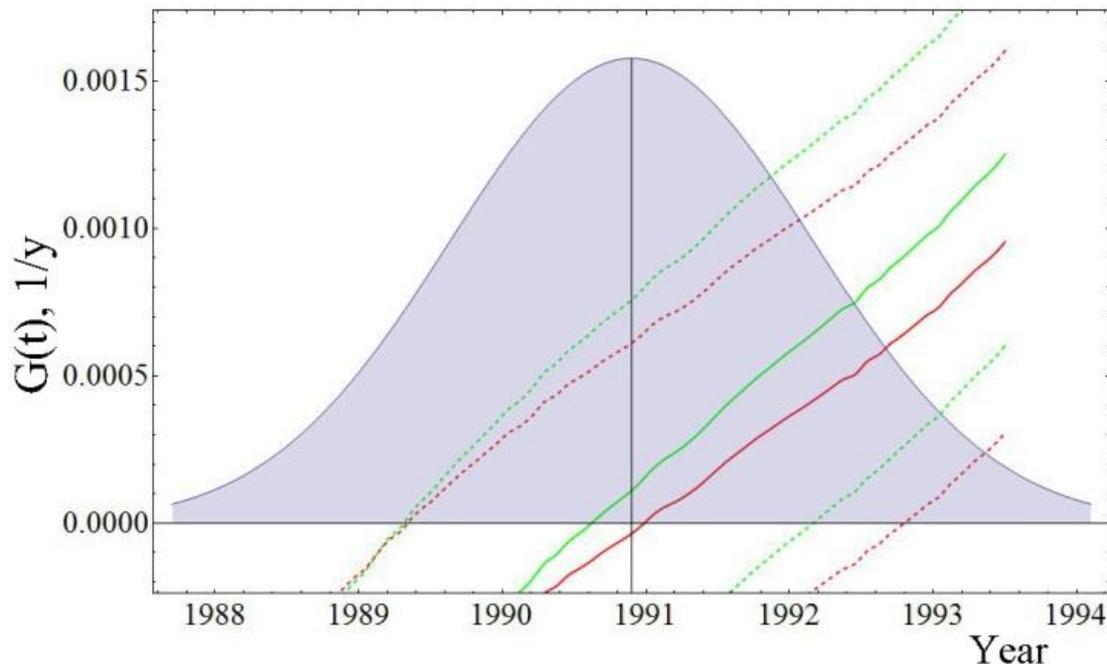
# Концентрация $^{14}\text{C}$ после ядерных испытаний



# Изменения концентрации $^{14}\text{C}$ в океане



После окончания атмосферных испытаний была пройдена точка равновесия:  $t_0 = 1990.9 \pm 1.6$  г

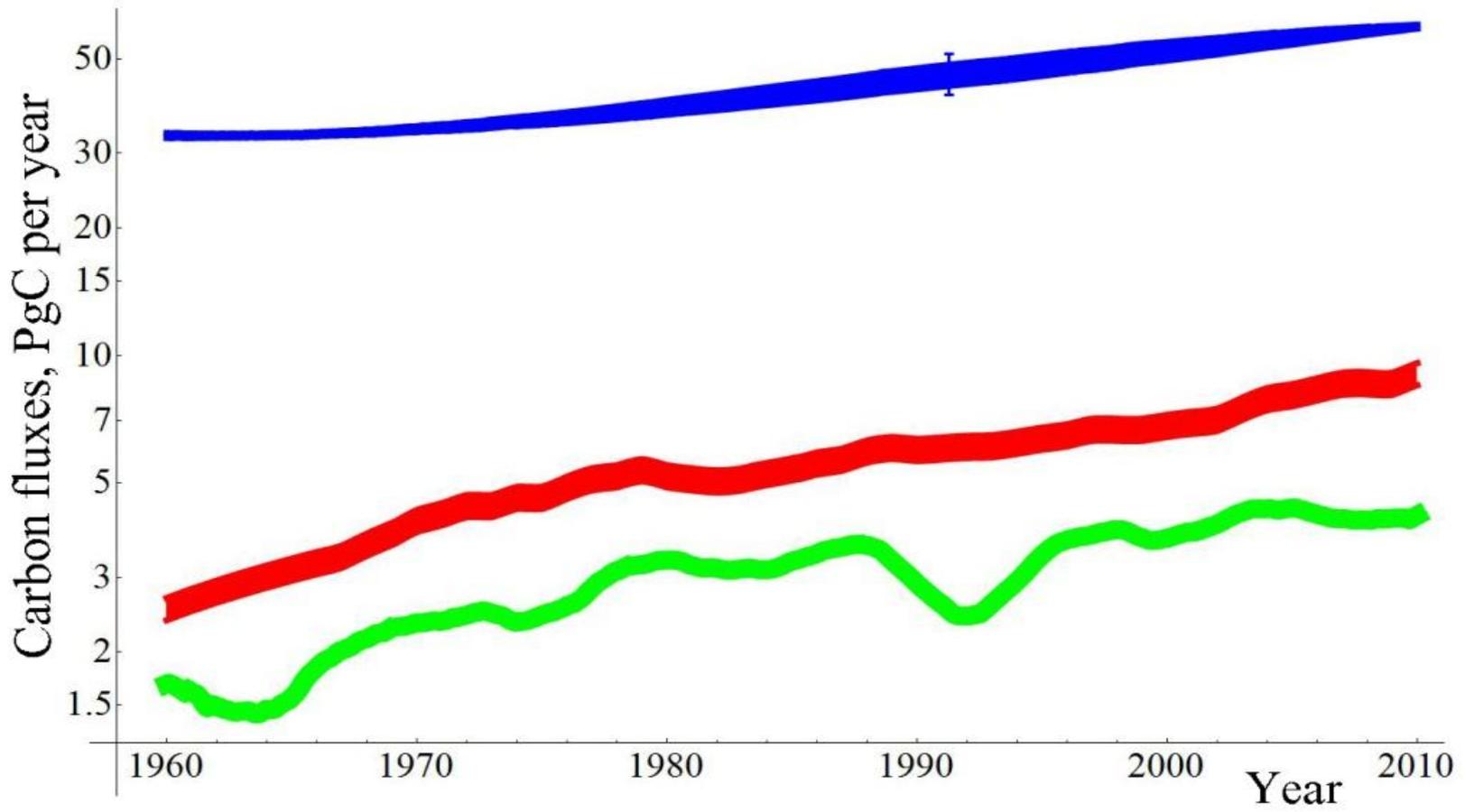


$$G(t) \equiv d \ln k / dt + r(t) = u(w - 1); G(t_0) = 0.$$

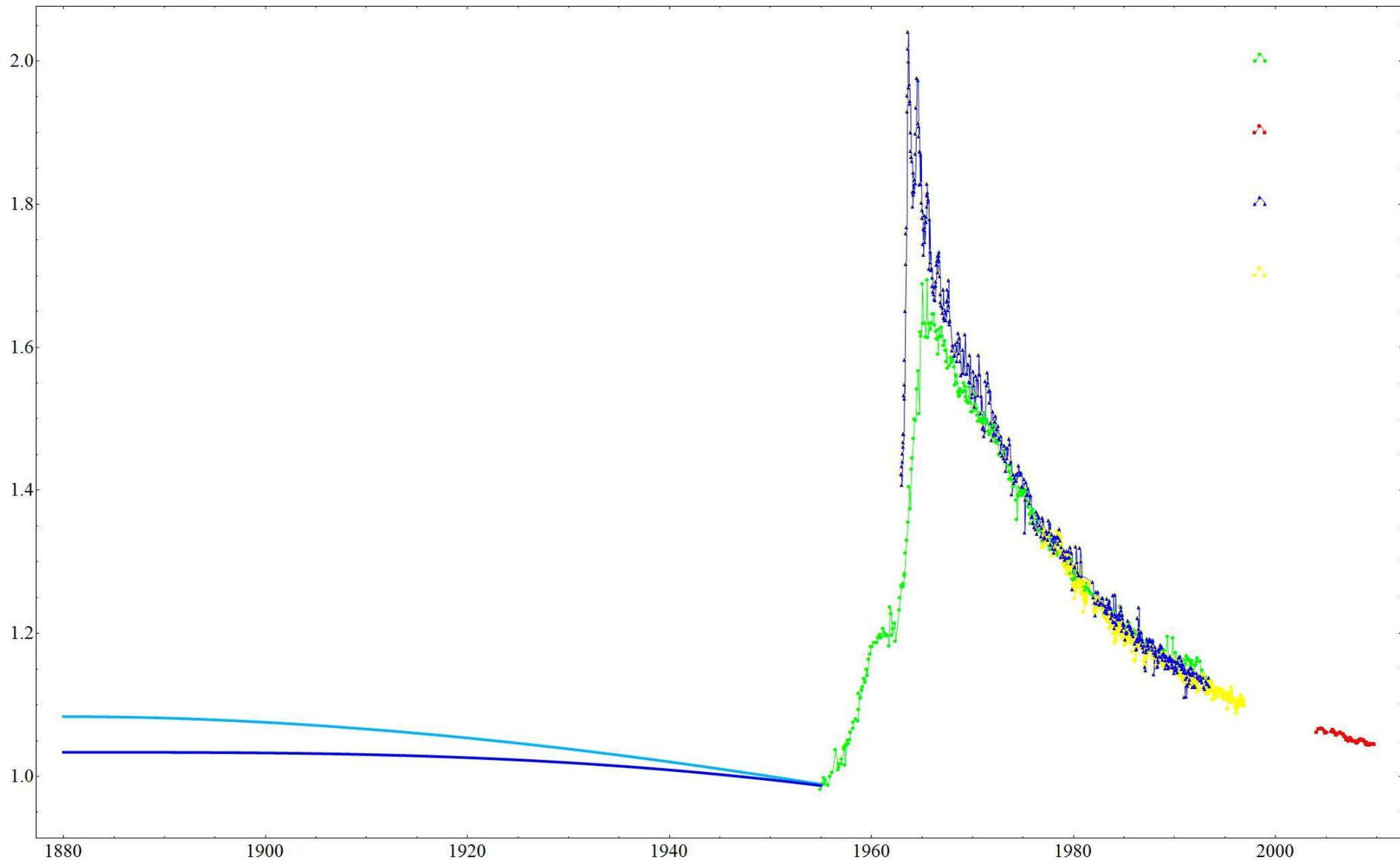
$$G_1 = dG / dt|_{t=t_0} = (4.7 \pm 0.3) 10^{-4} \text{ г}^{-2}. \text{ Можем вычислить}$$

$$u(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{G(t)}{(w - 1)} = \frac{G_1}{r(t_0)} = 0.061 \pm 0.01;$$

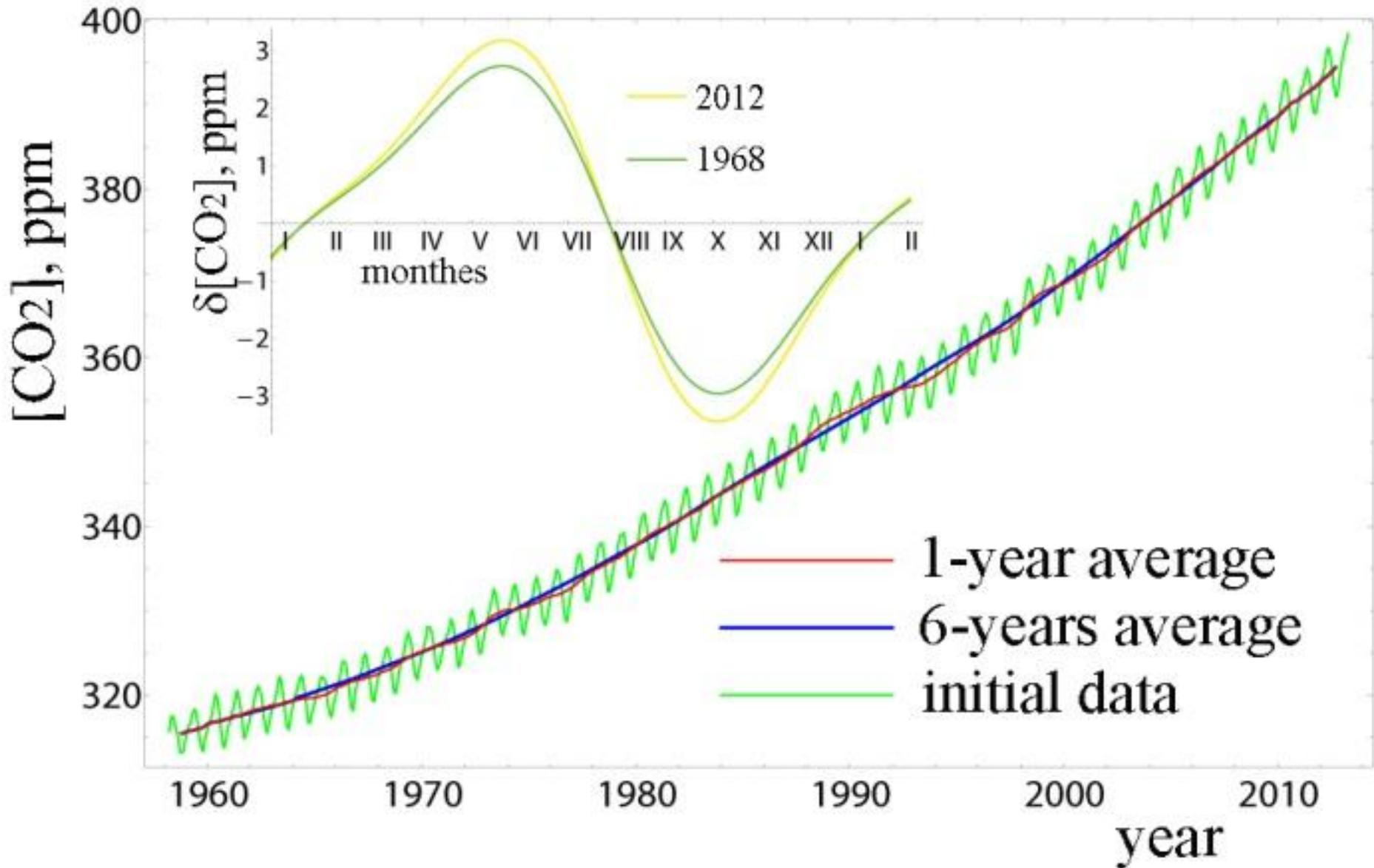
Потоки углерода: из океана в атмосферу (синяя), от сгорания топлив (красная) и прирост массы С (зеленая).



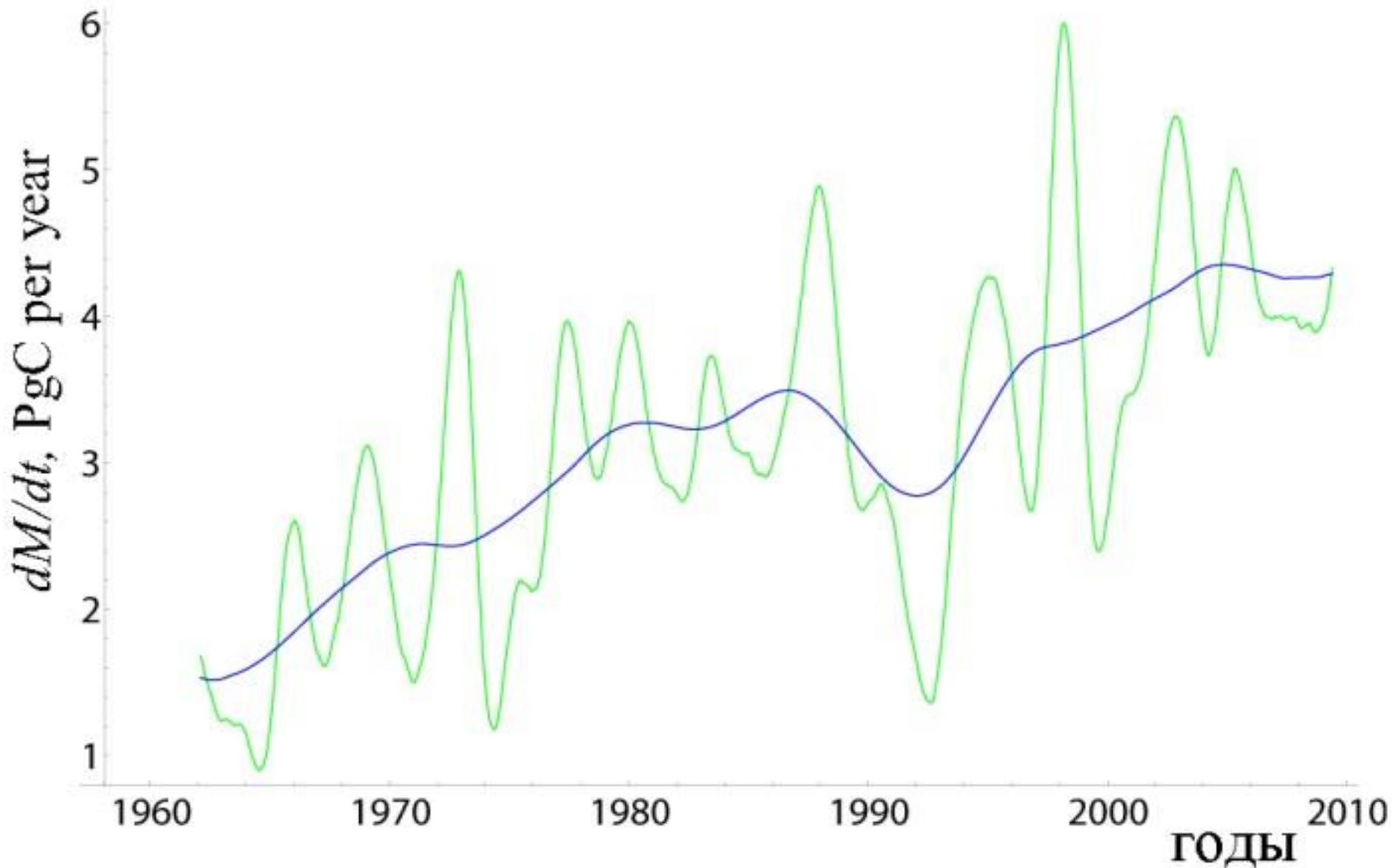
# Суэсс: $^{14}\text{C}$ разбавляется $^{12}\text{C}$ ископаемых топлив + ядерные тесты в атмосфере



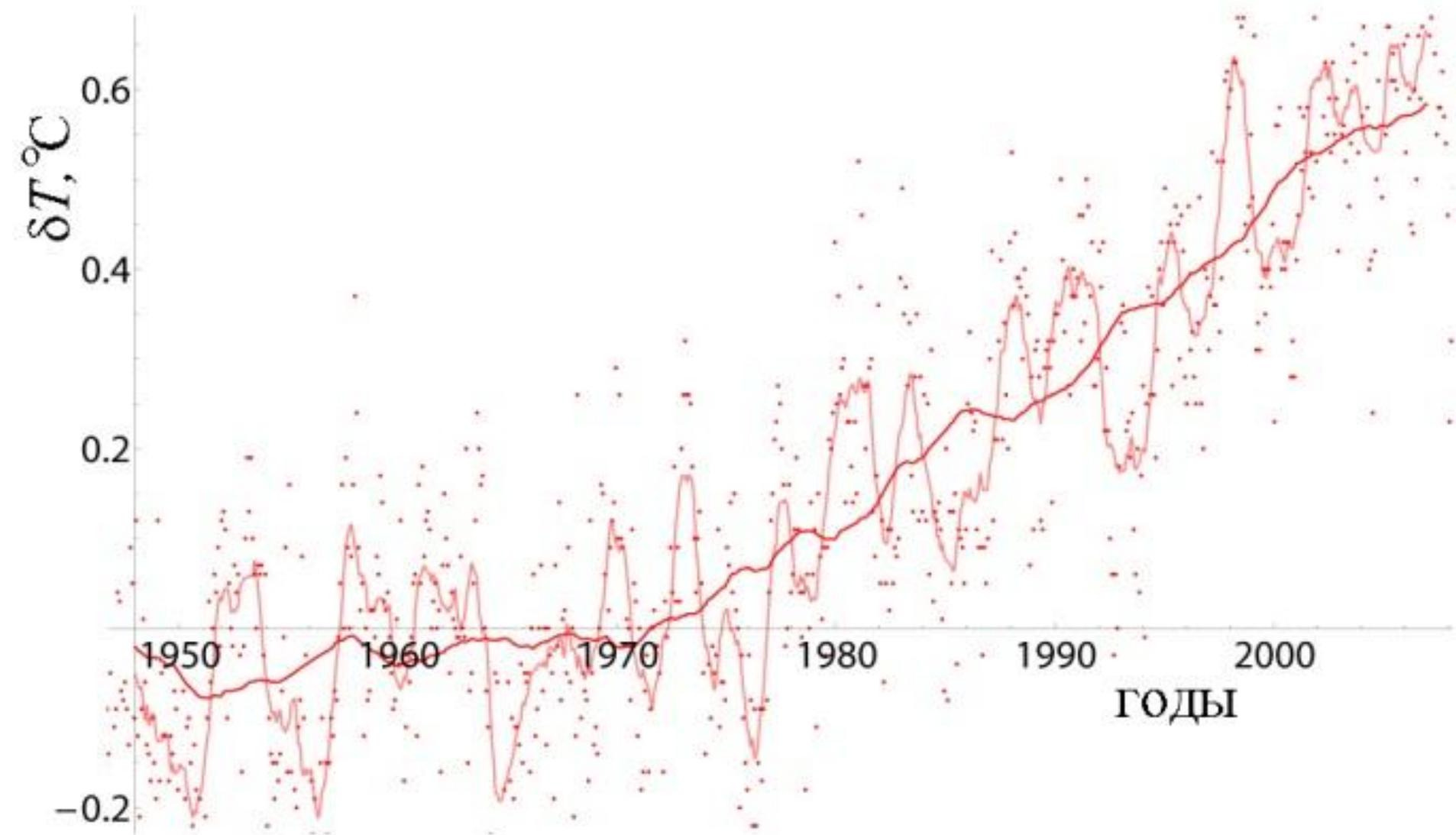
# Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере в частях на миллион (ppm)



# Квази-двухлетние колебания CO<sub>2</sub>



# Квази-двухлетние колебания температуры



# Спектр случайного процесса (Н.Винер, А.Я.Хинчин, А.Н.Колмогоров)

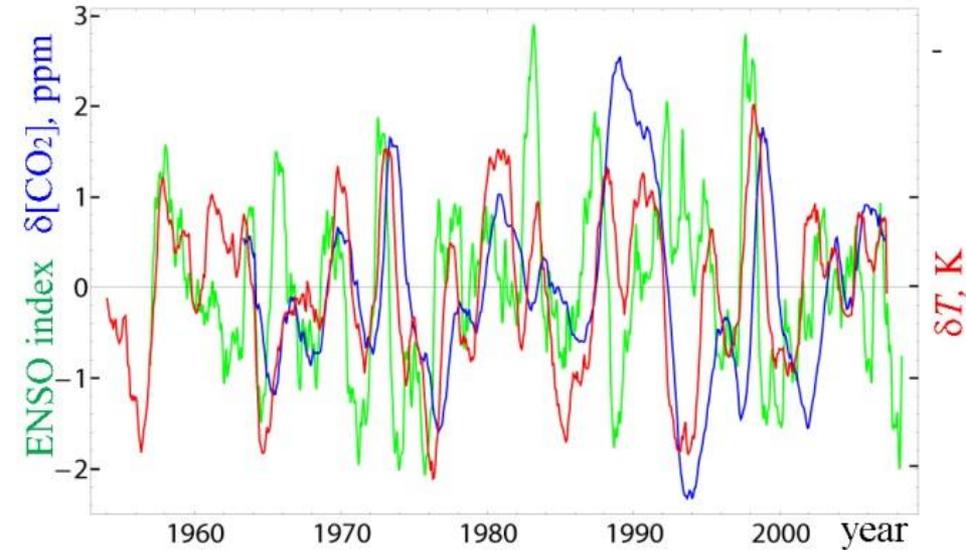
$$\bar{f} = N^{-1} \sum_{i=1}^N f_i; \quad D = N^{-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2$$

$$K(2r) = D^{-1} N^{-1} \sum_{i=1}^N (f_{i+r} - \bar{f})(f_{i-r} - \bar{f}).$$

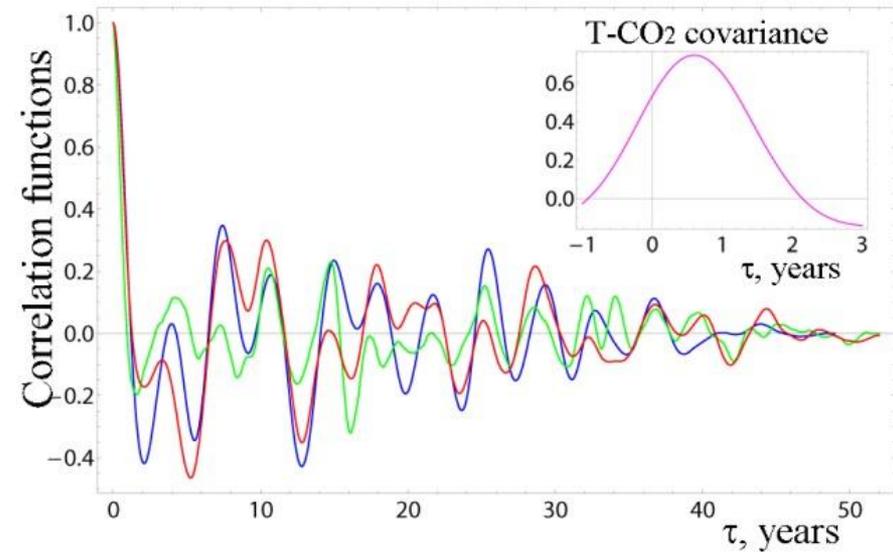
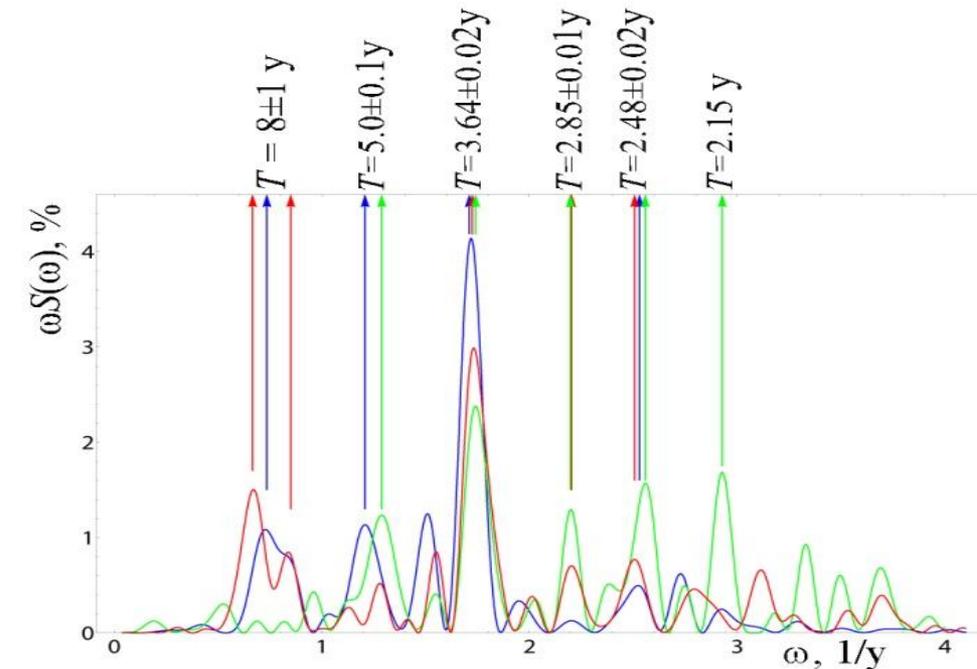
$$K(-r) = K(r); \quad K(0) = 1.$$

$$S(\omega) = (2\pi)^{-1} \int_0^{\infty} dr K(r) \cos \omega r.$$

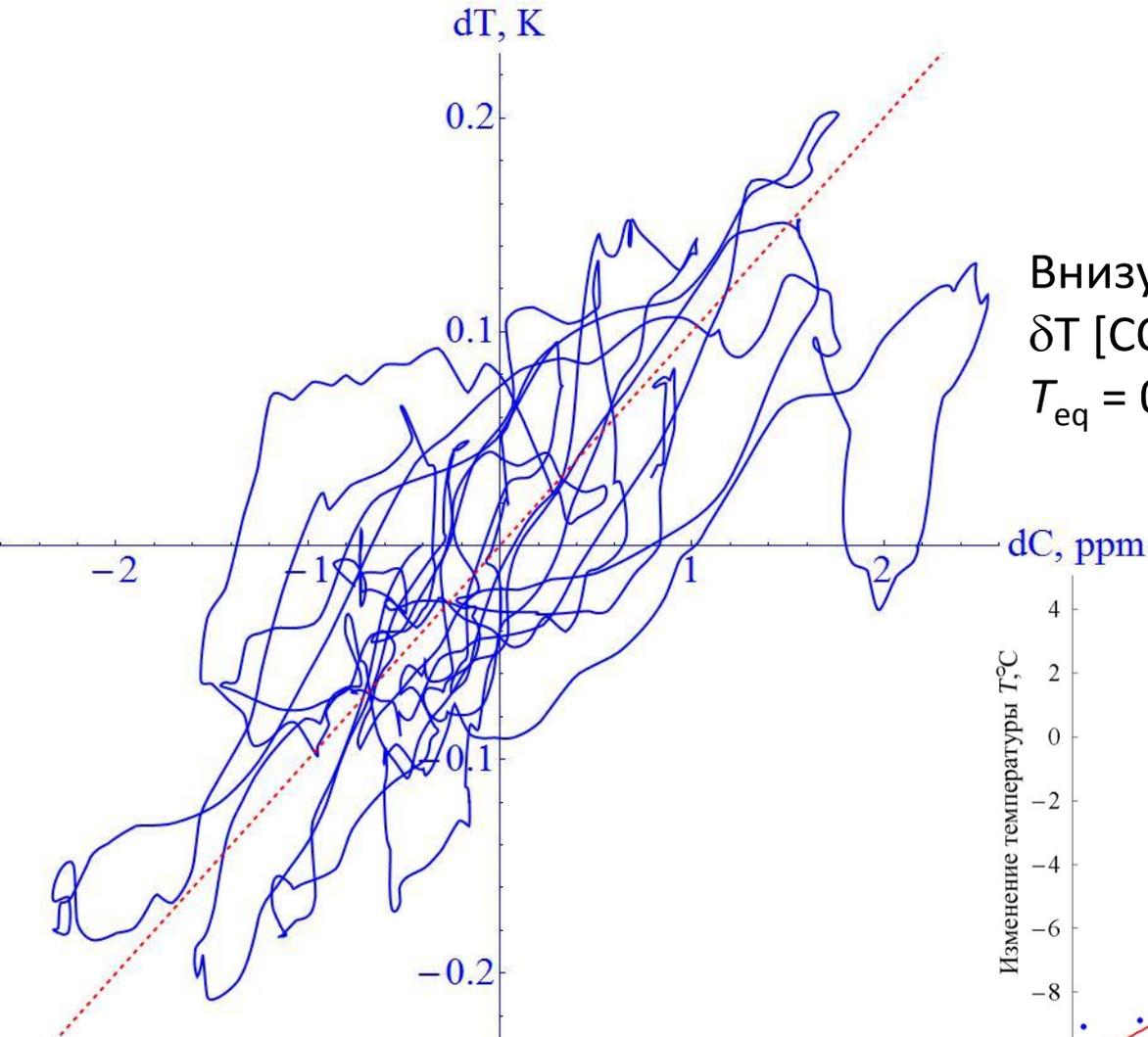
# Квази-«двухлетние» вариации: корреляции и спектры



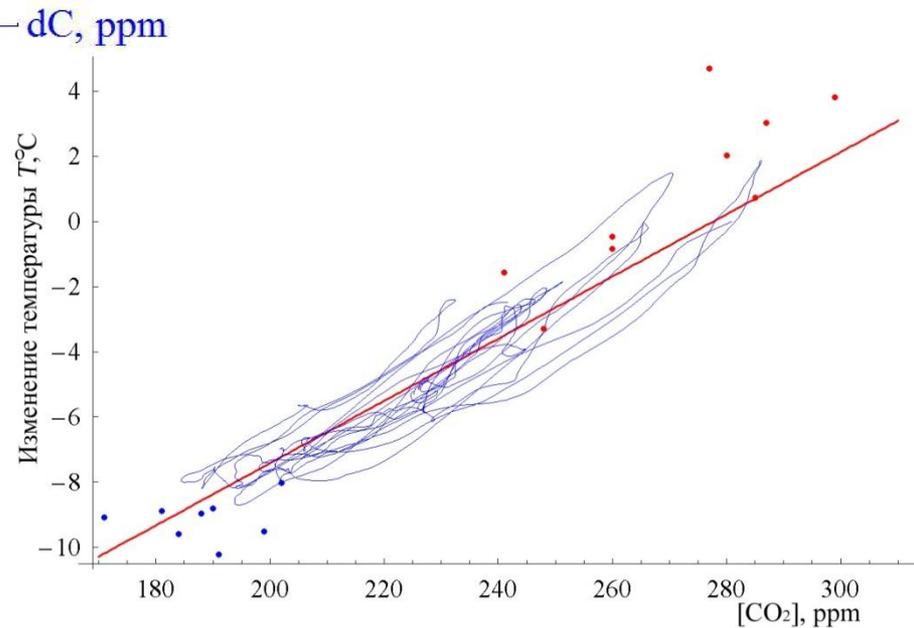
Линии:  
красные – температура, синие –  $\text{CO}_2$ ,  
зеленые – индекс ENSO (Эль-Ниньо)



Изменения  $\delta T$  от отстающего на 0.6 года  $\delta[\text{CO}_2]$  за с 1971 по 2008 гг. и регрессия  $\delta T = 0.1 \delta[\text{CO}_2]$  (красный пунктир)



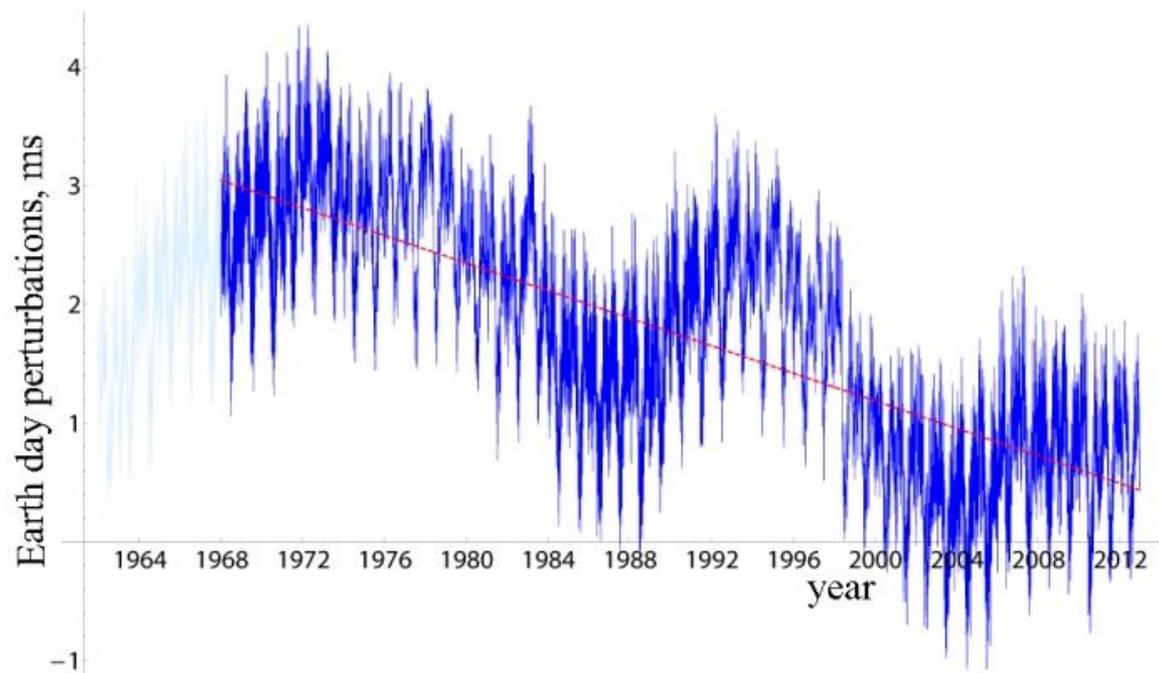
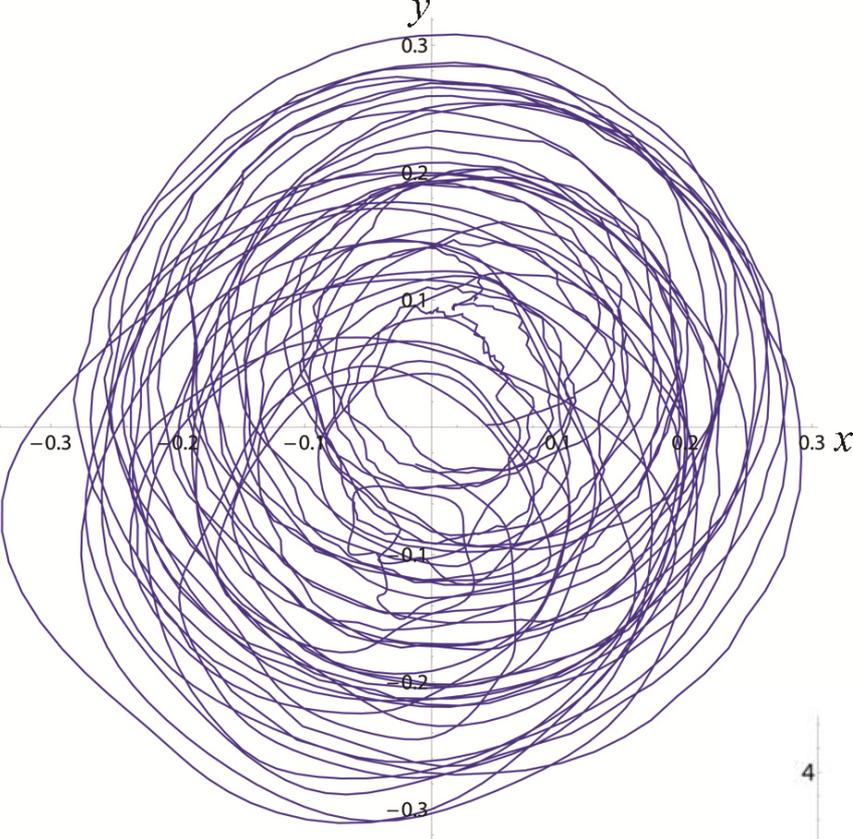
Внизу – аналогичная зависимость  $\delta T$  [ $\text{CO}_2$ ] за 800 тыс. лет. Регрессия:  
 $T_{\text{eq}} = 0.098[\text{CO}_2]_{\text{eq}} - 27.1^\circ\text{C}$ ;

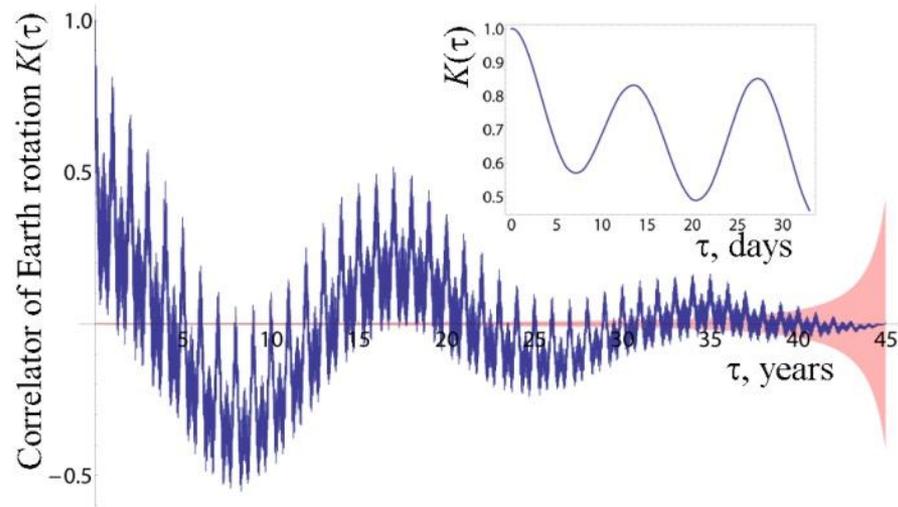


# Движение полюса Земли (Chandler, $T_{ch} = 436$ сут) и возмущения длительности суток с 1964 по 2012 гг.

International Earth Rotation and Reference  
Systems Service:

<http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts>.





# Коррелятор $K(\tau)$ и спектр $S(\omega)$ вариаций скорости вращения Земли

