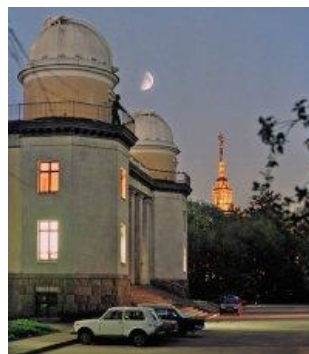


О сходстве во вращении Земли и изменениях климата

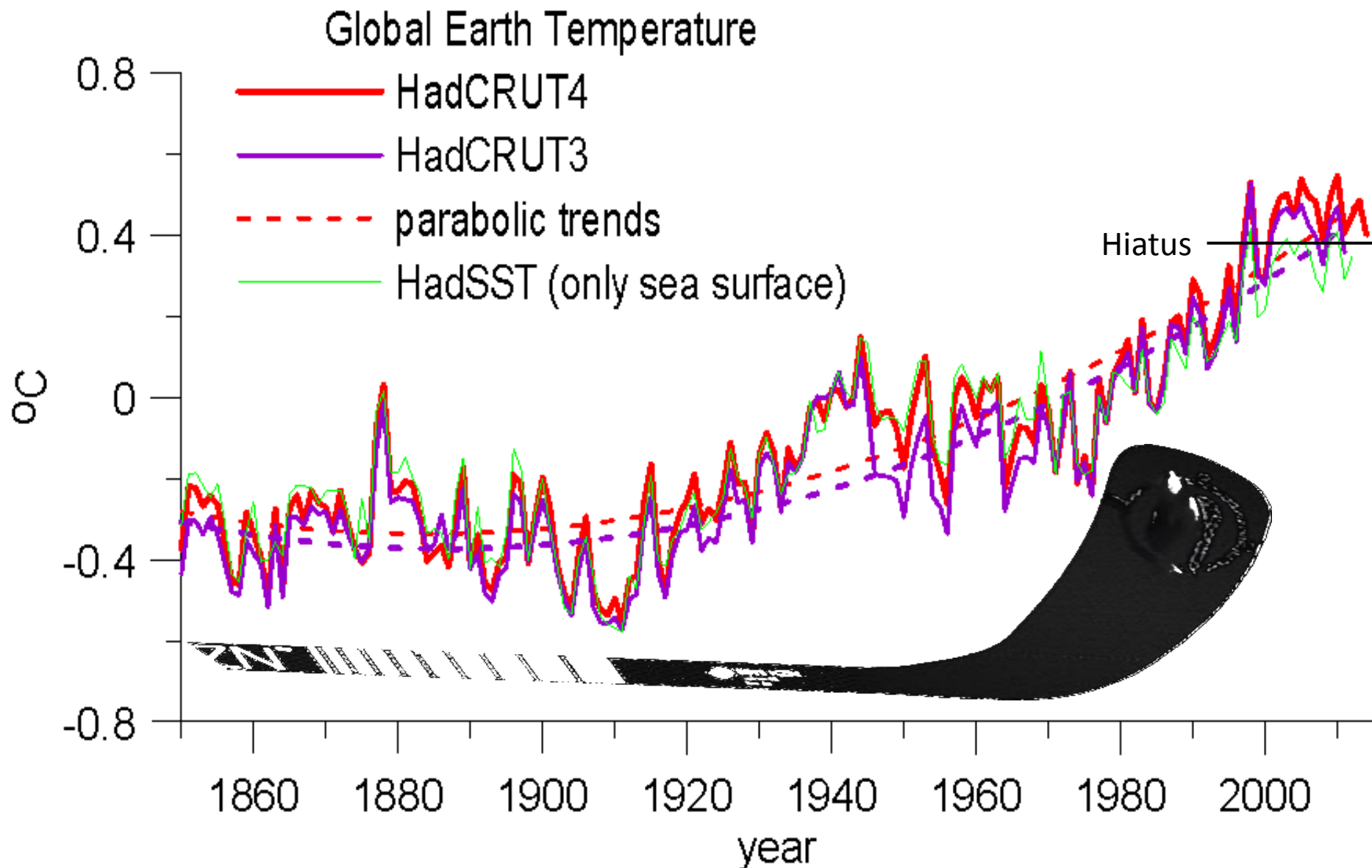
Леонид Зотов

ГАИШ МГУ,
МИЭМ ВШЭ

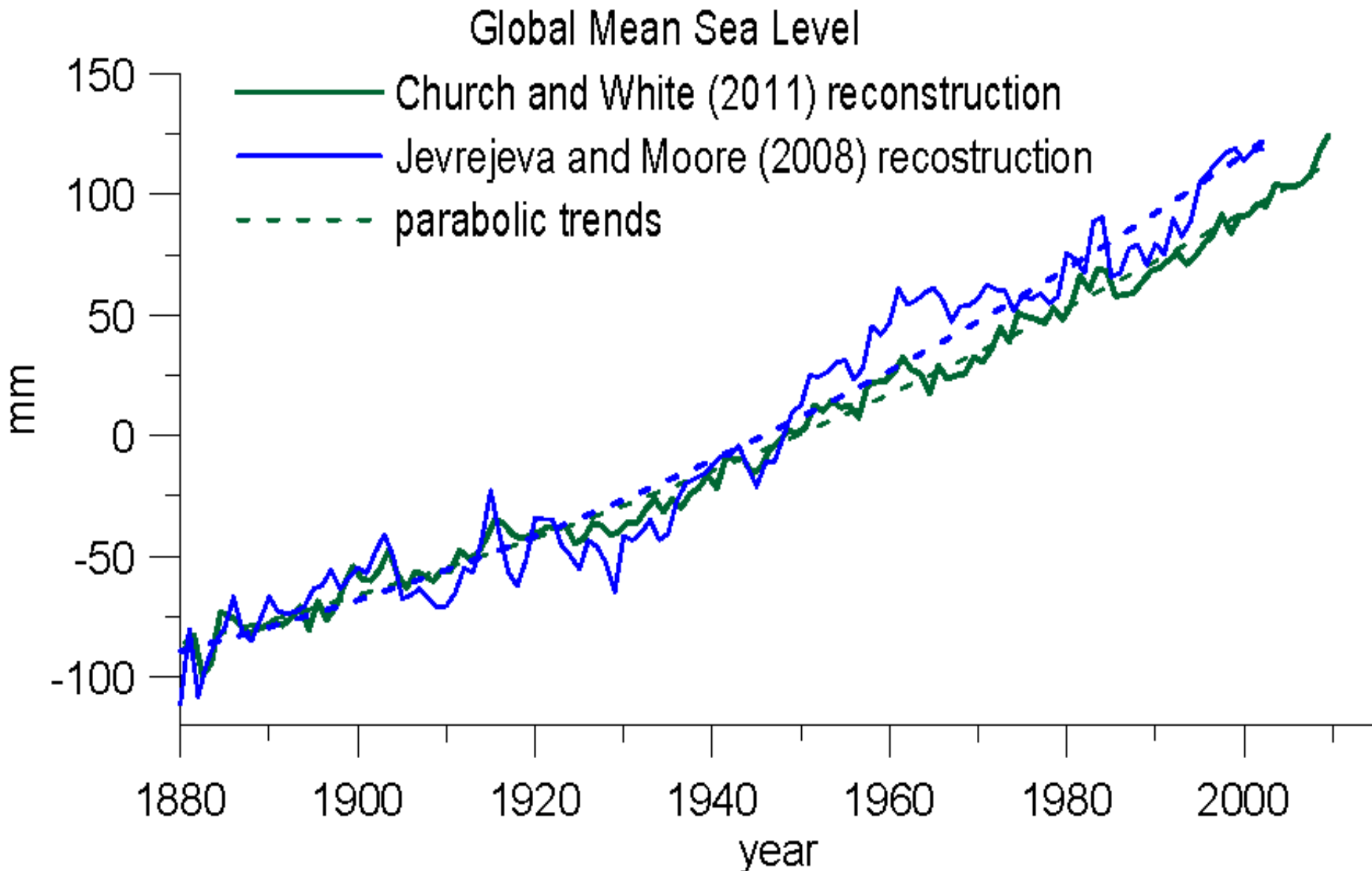


Доклад на Секции геодезии
НГК РАН
20 января 2015

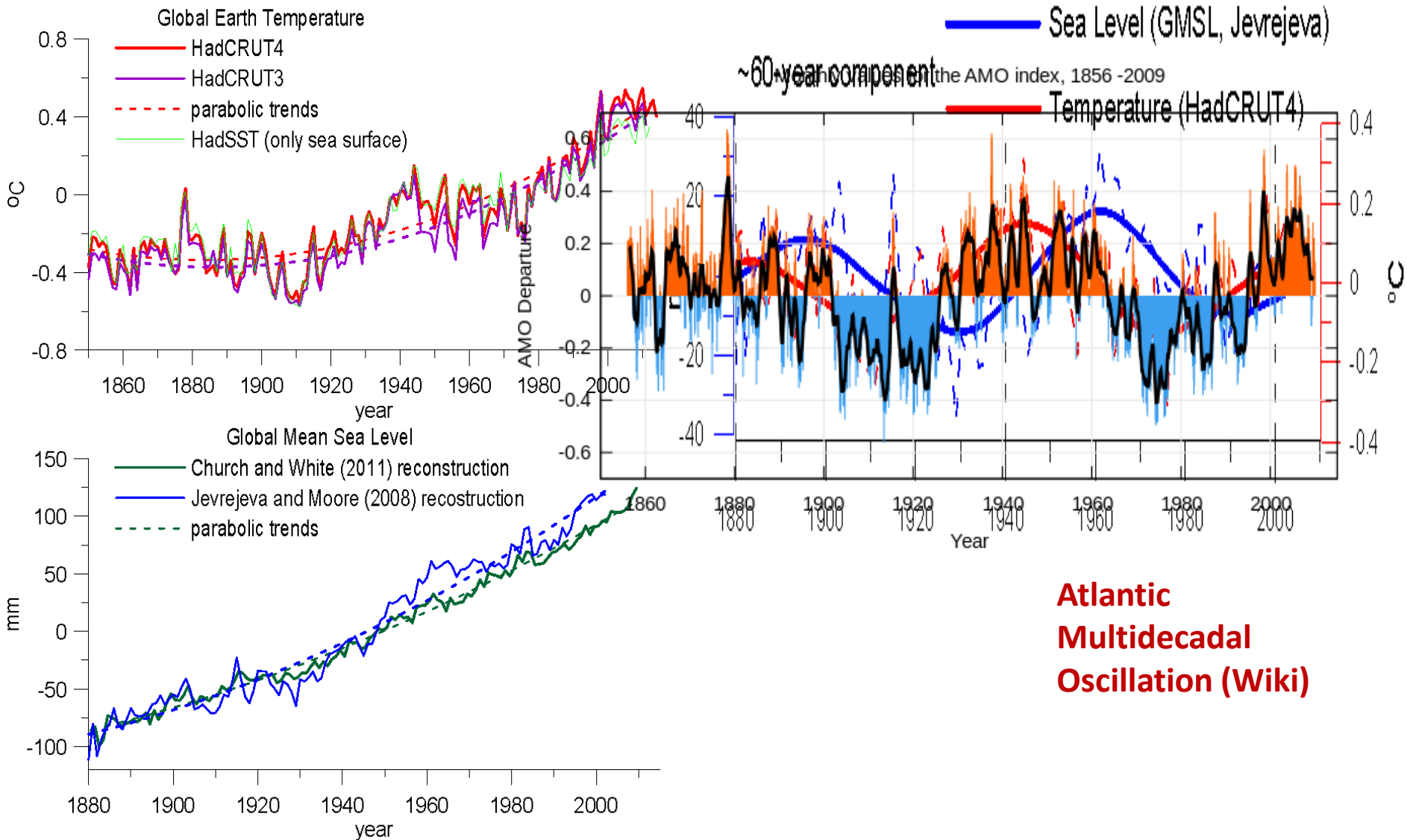
Глобальная температура на Земле



Изменения уровня моря

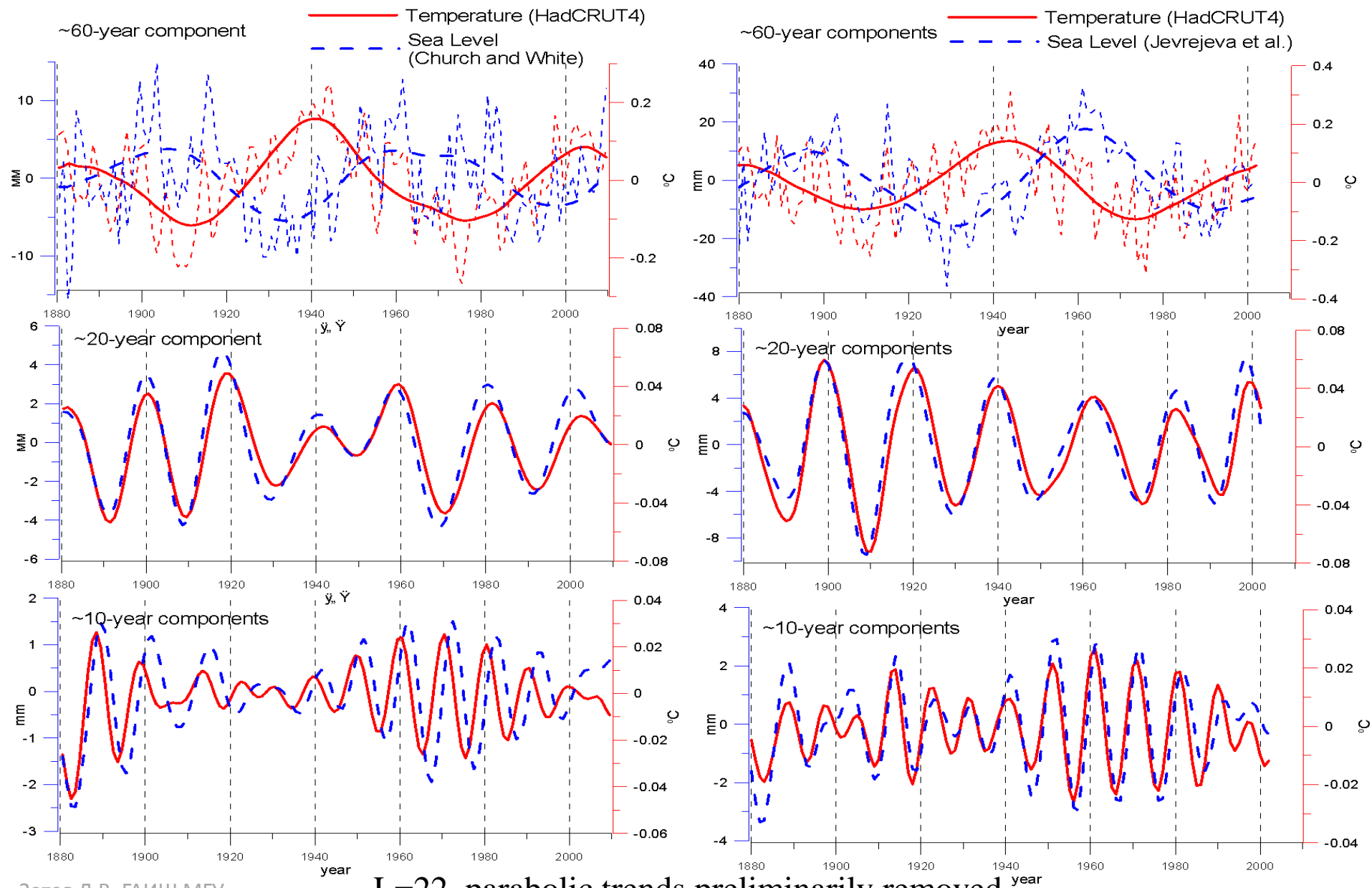


2-D Сингулярный Спектральный Анализ (ССА) данных по температуре и уровню моря

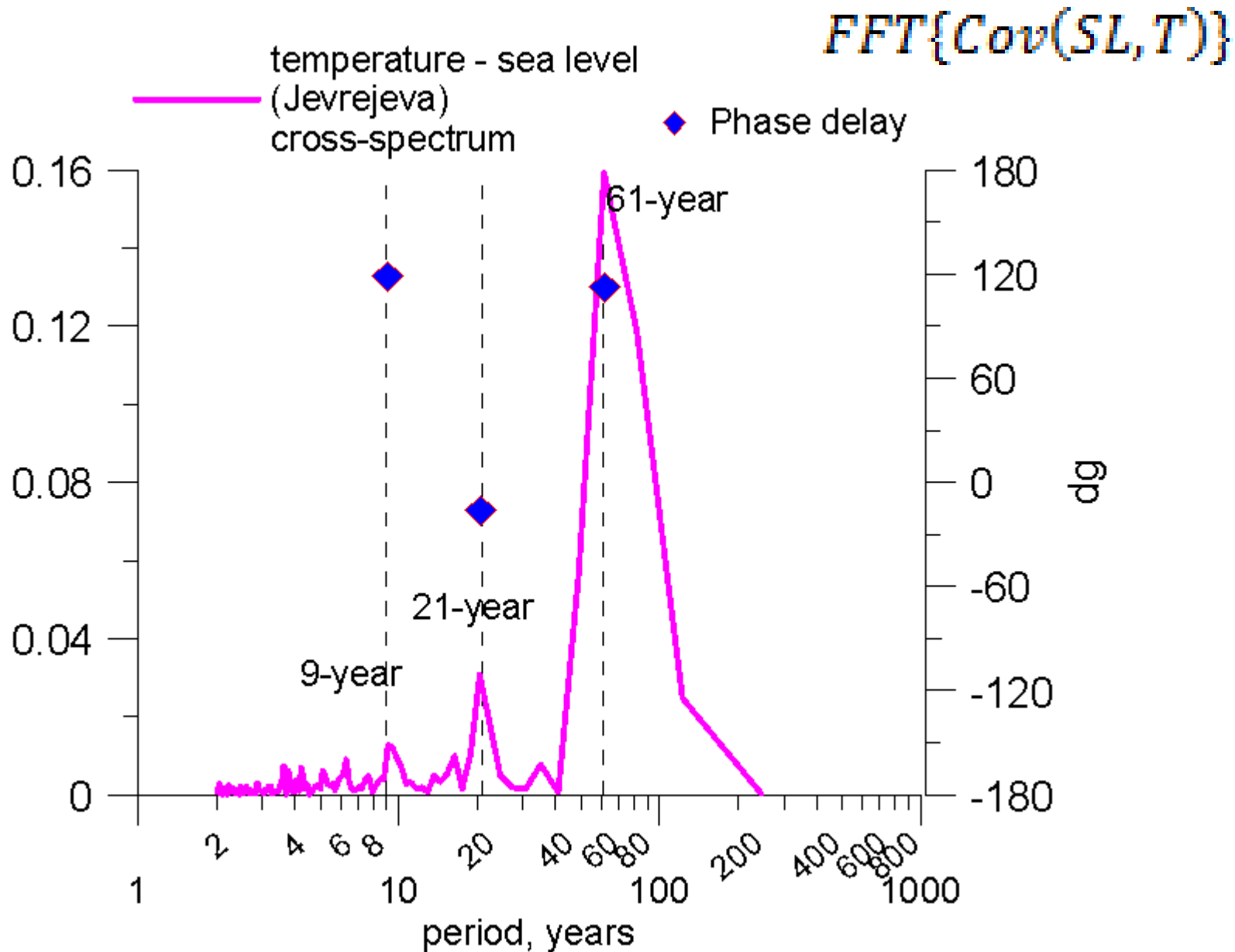


**Atlantic
Multidecadal
Oscillation (Wiki)**

Многоканальный ССА температуры и уровня моря



Кросс-спектр температуры и уровня моря



Результаты нелинейного МНК

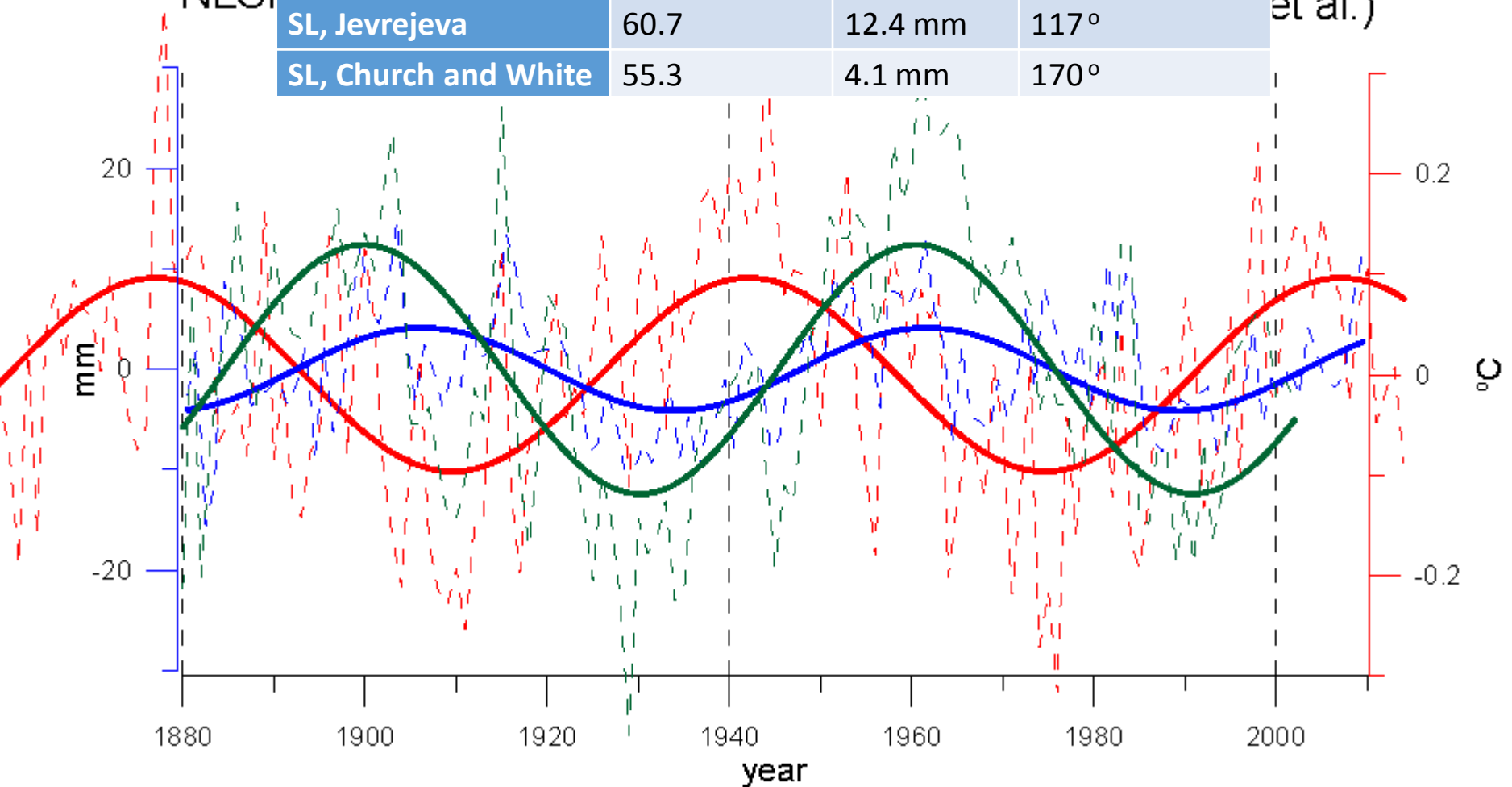
~60-yr NLSM

~60-year component NLSM fit			
Component	Period, years	Amplitude	Phase (1880)
T, HadCrut4	65.0	0.1 °C	-16°
SL, Jevrejeva	60.7	12.4 mm	117°
SL, Church and White	55.3	4.1 mm	170°

JT4)

d White)

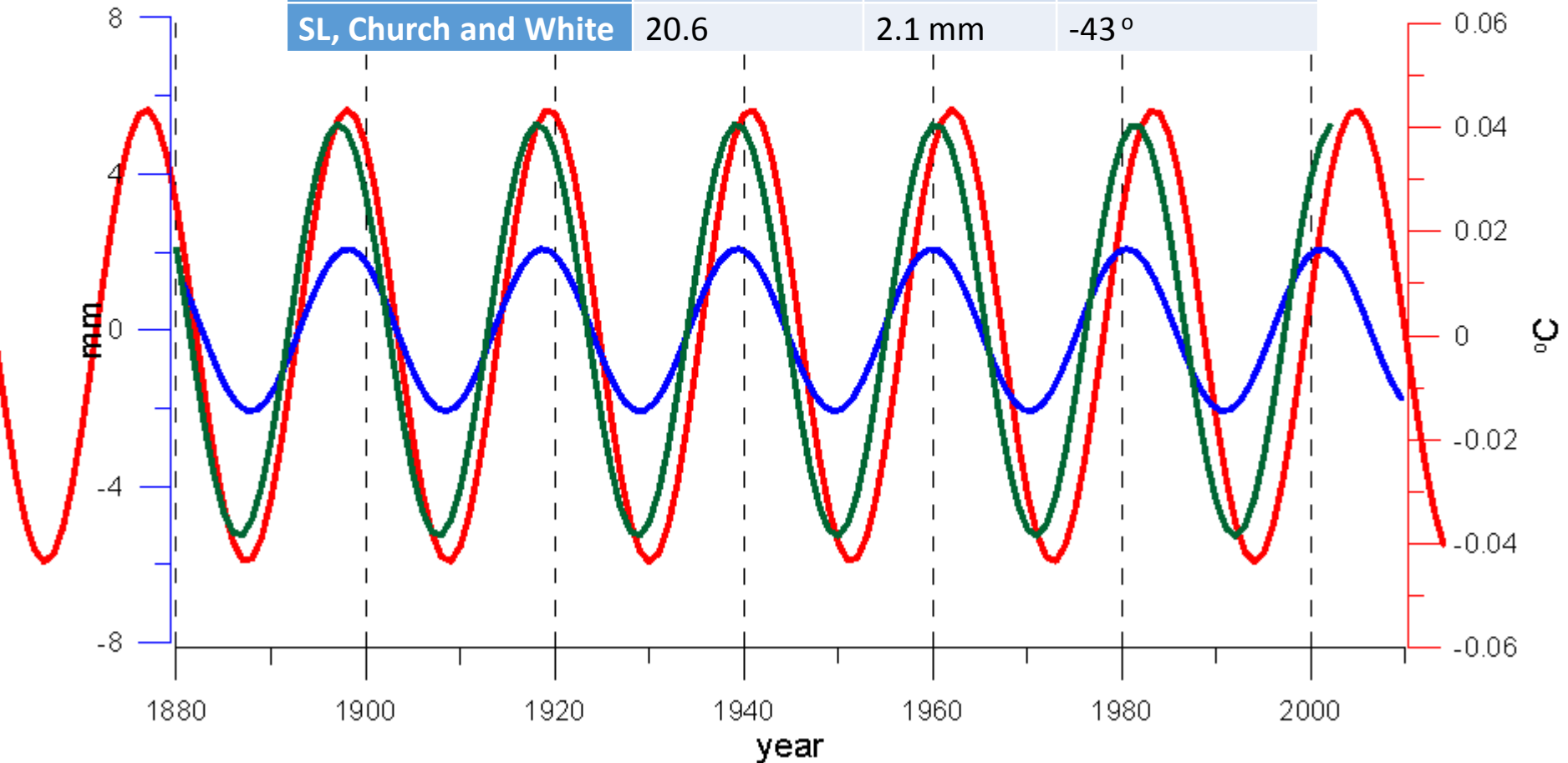
et al.)



Результаты нелинейного МНК

~20-y NLSM

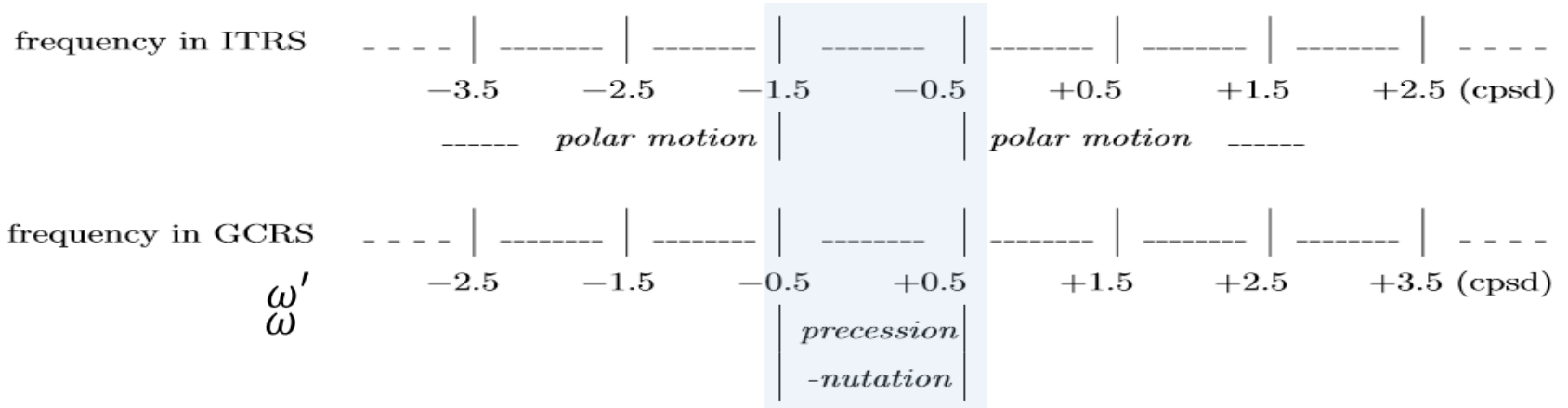
~20-year component NLSM fit			
Component	Period, years	Amplitude	Phase (1880)
T, HadCrut4	21.3	0.043 °C	-55°
SL, Jevrejeva	21.1	5.3 mm	-67°
SL, Church and White	20.6	2.1 mm	-43°





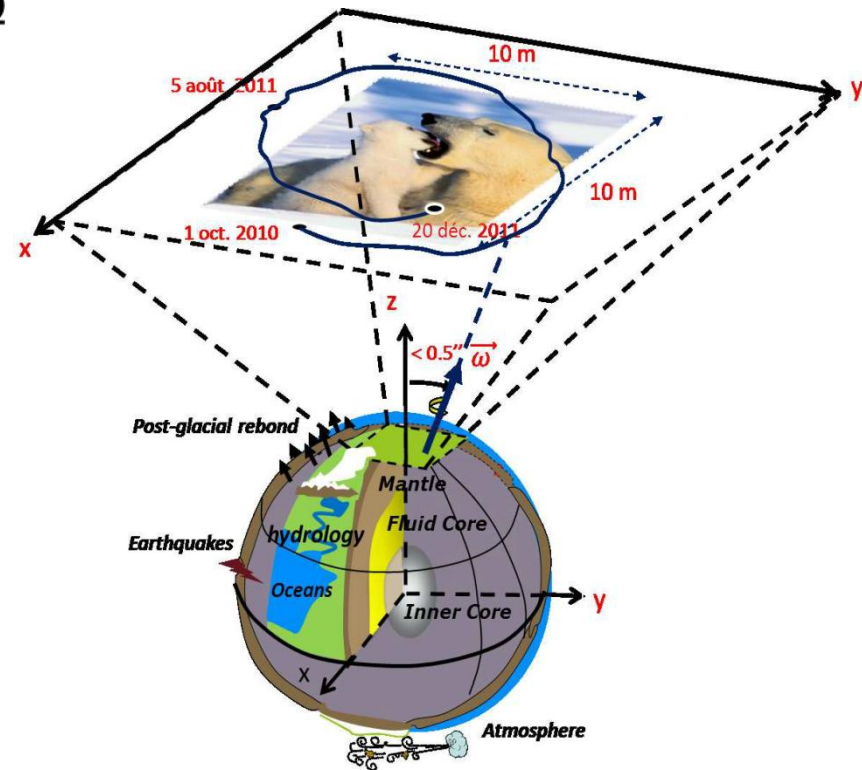
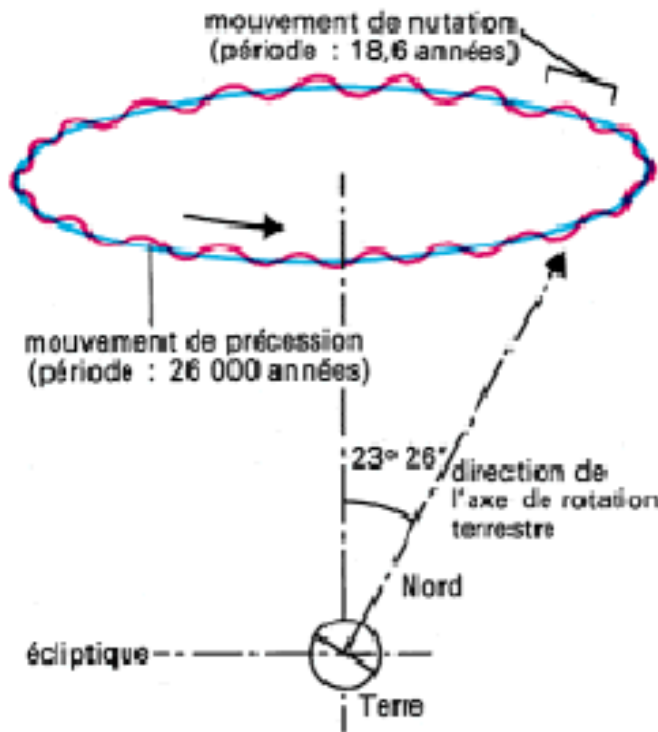
P. Brueghel the Yonger *Landscape with a Bird Trap* (1565), Tokyo museum of Western art

Прецессия, нутация и движение полюса



$$\omega' = \omega + \Omega$$

CRF TRF



Вращение твердого тела

$$\dot{H} + [\omega H] = L$$

Уравнения Эйлера с правой частью

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} + (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3 = L_1$$

$$I_2 \frac{d\omega_2}{dt} + (I_1 - I_3)\omega_3\omega_1 = L_2$$

$$I_3 \frac{d\omega_3}{dt} + (I_2 - I_1)\omega_1\omega_2 = L_3$$

Уравнения Эйлера свободной нутации

$$\frac{d\omega_1}{dt} + \frac{(I_3 - I_2)}{I_1} \omega_2\omega_3 = 0$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} + \frac{(I_1 - I_3)}{I_2} \omega_3\omega_1 = 0$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} + \frac{(I_2 - I_1)}{I_3} \omega_1\omega_2 = 0$$

Euler (1750) prédit le mouvement libre du pôle d'une Terre rigide

- Euler : concept de *moment cinétique* et *théorème du moment cinétique*.
Dans le repère géocentrique non-tournant:

$$\frac{d\vec{H}}{dt} = \vec{L}$$

\vec{H} : moment cinétique de rotation \vec{L} : moment des forces externes



Leonard Euler
(1707-1783)

- Projection sur les axes d'un repère tournant avec la Terre

$$\frac{d\underline{H}}{dt} + \underline{\omega} \otimes \underline{H} = \underline{L}$$

- Dans le repère des axes principaux d'inertie

$$\underline{H} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}$$

on obtient les *équations dynamiques d'Euler*:

$$A\dot{\omega}_x - (C - A)\omega_y\omega_z = L_x$$

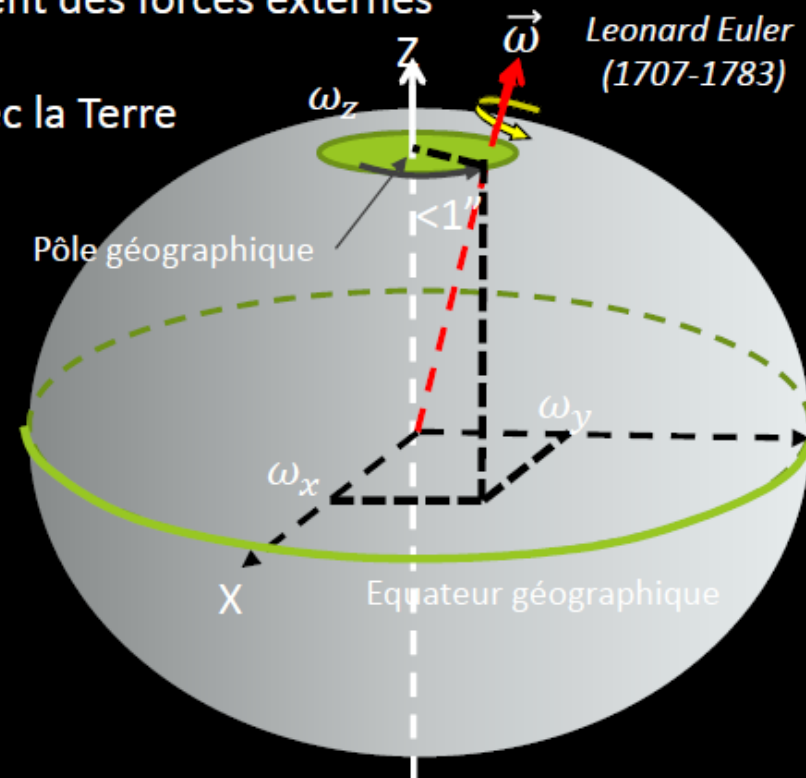
$$A\dot{\omega}_y + (C - A)\omega_x\omega_z = L_y$$

$$C\dot{\omega}_z = L_z$$

Solution libre :

$$\omega_z = Cte = \Omega$$

$$\omega_x + i\omega_y = \omega_0 e^{i\sigma_e t} : \text{mouvement circulaire à la pulsation } \sigma_e = \frac{C-A}{A}\Omega = \Omega/304,5$$



Gxyz: axes principaux d'inertie

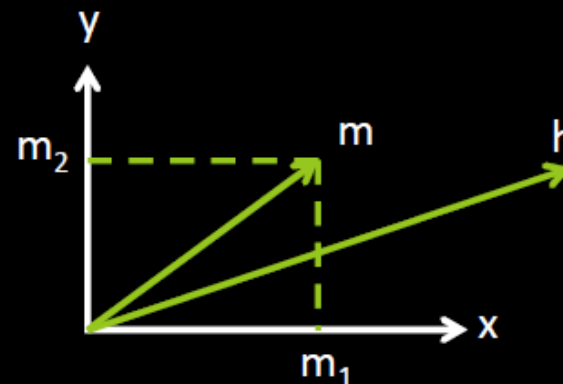
Dans le plan complexe:

$$m = m_1 + i m_2$$

$$c = c_{13} + i c_{23}$$

$$h = h_1 + i h_2$$

$$L = L_1 + i L_2$$



$$\frac{d\underline{H}}{dt} + \underline{\omega} \otimes \underline{H} = \underline{L} \quad \text{avec} \quad \underline{H} = \bar{I} \underline{\omega} + \underline{h}$$

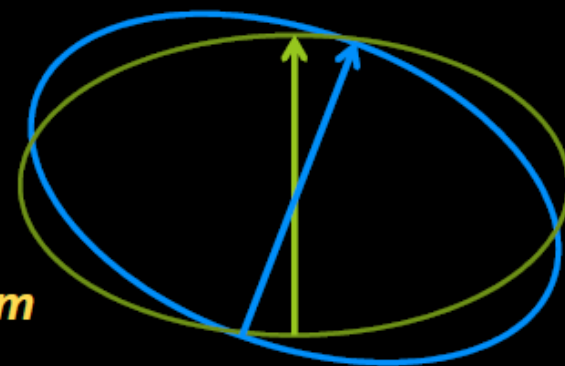
Linéarisation des équations d'Euler-Liouville (partie équatoriale)

$$m + i \frac{1}{\sigma_e} \dot{m} = \frac{\Omega c + h}{(C - A)\Omega} - i \frac{\Omega \dot{c} + \dot{h}}{(C - A)\Omega^2} + i \frac{L}{(C - A)\Omega^2}$$

avec la pulsation d'Euler $\sigma_e = \frac{C-A}{A} \Omega = \frac{\Omega}{304,5}$



MAREE DU POLE:



Variation du potentiel centrifuge proportionnelle à m

Déformation centrifuge proportionnelle à m

Variation centrifuge $\Delta c_{13} + i \Delta c_{23}$ proportionnelle à m

Conséquence sur la période du mode libre: allongement de 140 jours

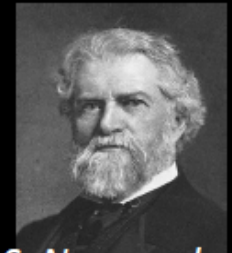
Déformation centrifuge

$$\psi(r) = \frac{\Delta c_{13} + i\Delta c_{23}}{C-A} = \frac{\tilde{k}}{k_s} m \cong 0.35 (1 - i0.01)m$$

Rétro-action (Newcomb 1892)

$$m + i \frac{1}{\sigma_e} \dot{m} = \frac{\Omega c + h}{(C-A)\Omega} - i \frac{\Omega \dot{c} + \dot{h}}{(C-A)\Omega^2} + i \frac{L}{(C-A)\Omega^2}$$

avec la pulsation d'Euler $\sigma_e = \frac{C-A}{A} \Omega = \Omega/303$



S. Newcomb
(1835-1909)

$$m + i \frac{1}{\tilde{\sigma}_c} \dot{m} = \frac{1}{1 - \frac{\tilde{k}_2}{k_s}} \left[\frac{\Omega c^{\text{"pure"}} + h^{\text{"pure"}}}{(C-A)\Omega} - i \frac{\Omega \dot{c}^{\text{"pure"}} + \dot{h}^{\text{"pure"}}}{(C-A)\Omega^2} \right] + i \frac{L}{(C-A)\Omega^2}$$

Excitation géophysique

avec $\tilde{\sigma}_c = \left(1 - \frac{\tilde{k}}{k_s}\right) \sigma_e \cong \frac{\Omega}{480} \left(1 + \frac{i}{200}\right)$ pulsation de Chandler (480 jours)

Manteau-noyau découplé $\rightarrow \tilde{\sigma}_c \cong \frac{\Omega}{433} \left(1 + \frac{i}{200}\right)$ (433 jours)

Динамическая система вращения Земли

$$\frac{i}{\sigma_c} \frac{dm(t)}{dt} + m(t) = \Psi(t)$$

$$m = m_1 + im_2$$

$$\Psi = \Psi_{mass} + \Psi_{motion}$$

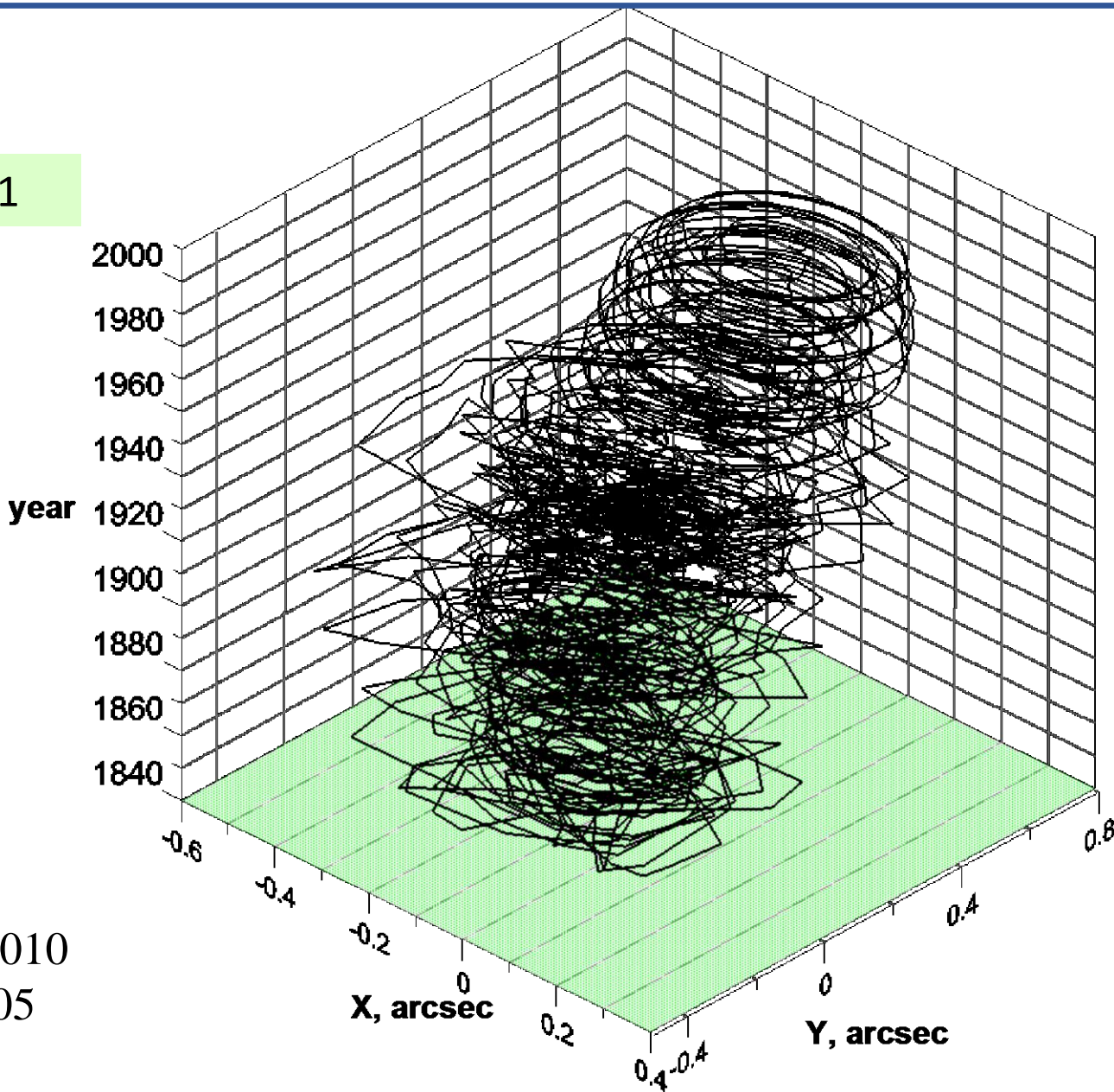
$$\sigma_c = 2\pi f_c (1 + i/2Q)$$

$$f_c = \frac{1}{433} \text{ days}^{-1} \quad Q = 175$$

Munk W.H., MacDonald G.J.F., The rotation of the Earth, 1960

Движение полюса Земли (PM)

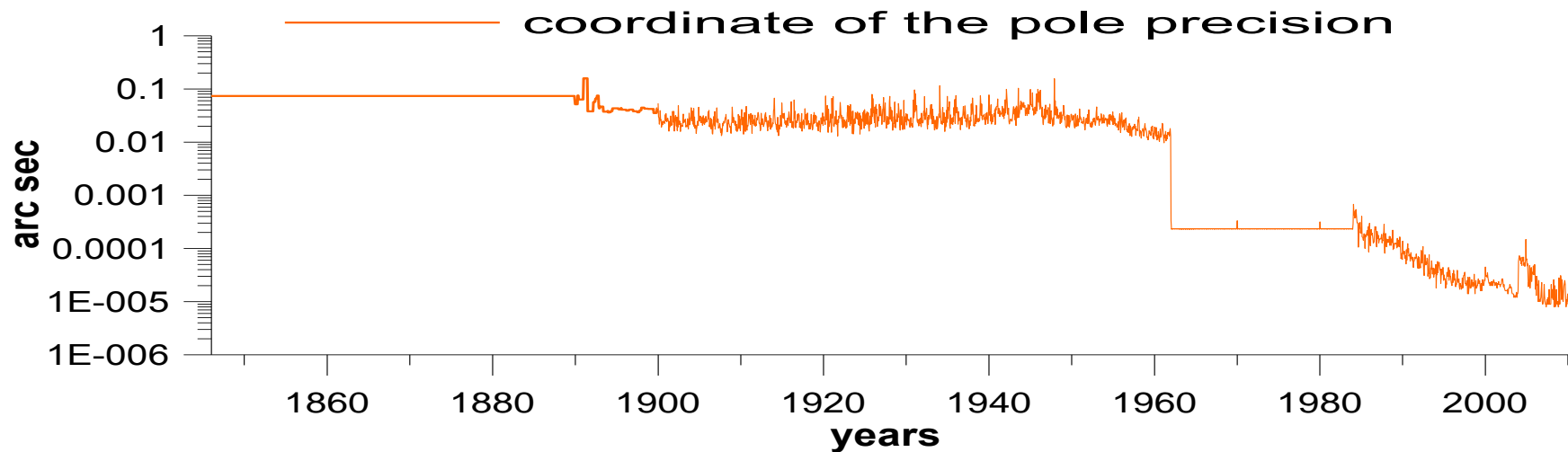
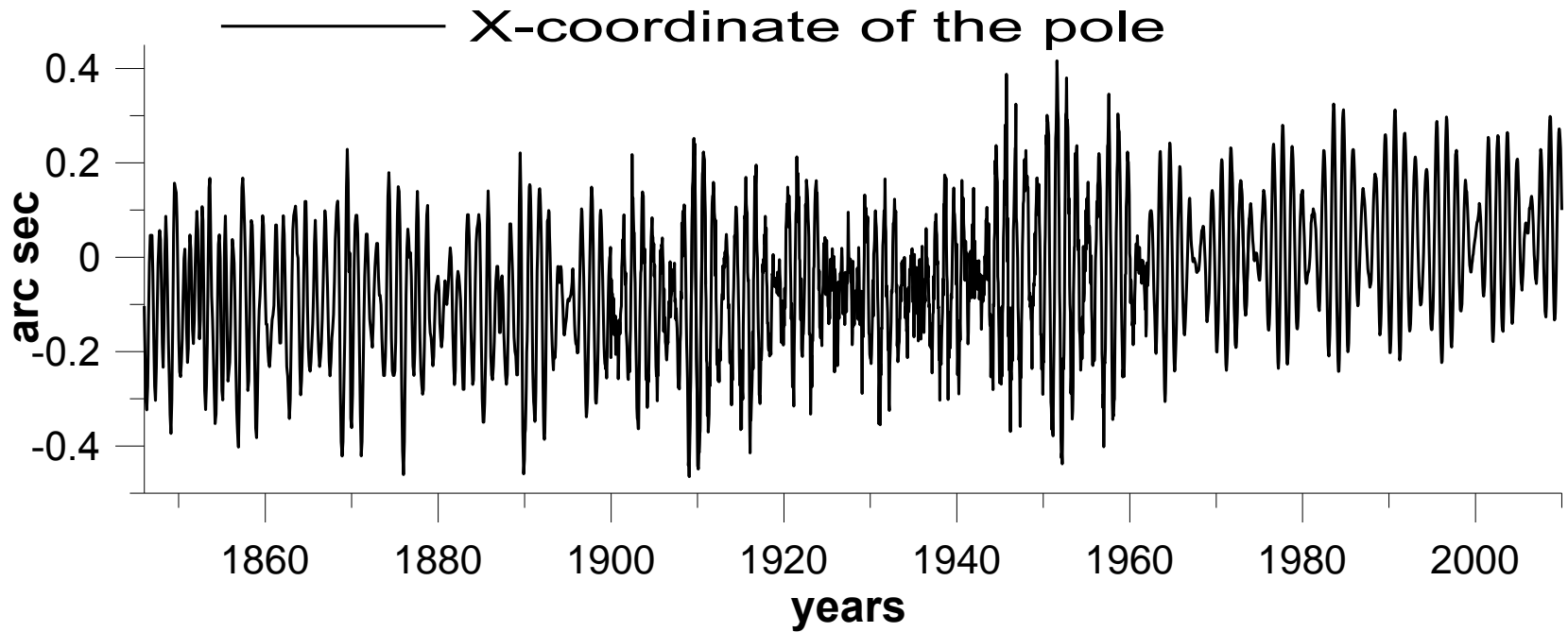
EOP CO1



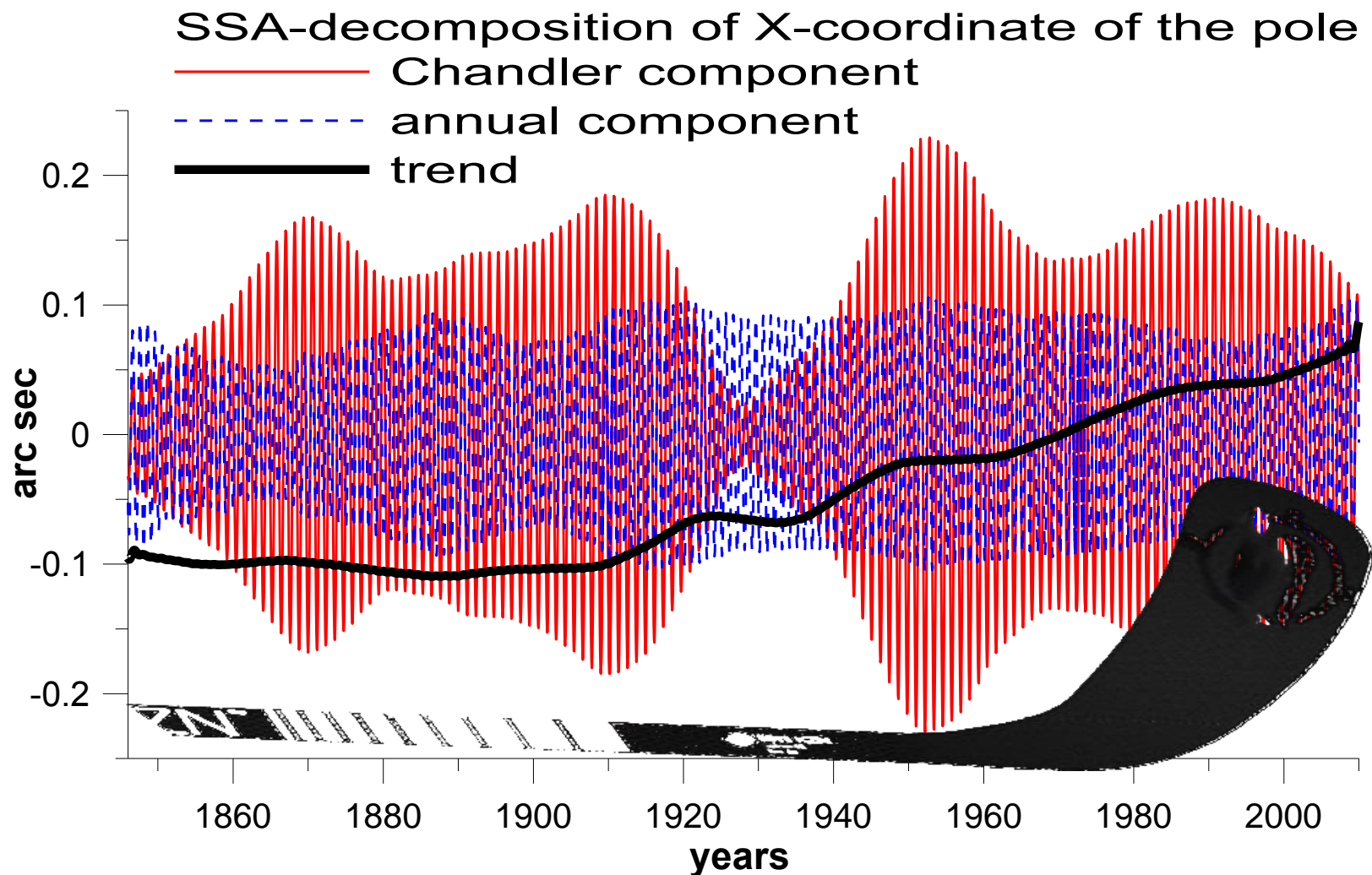
2D -
траектория
 $m(t) = x - iy$

1846-2010
шаг 0.05
года

X-координата полюса и ее точность



Комплексный сингулярный спектральный анализ движения полюса

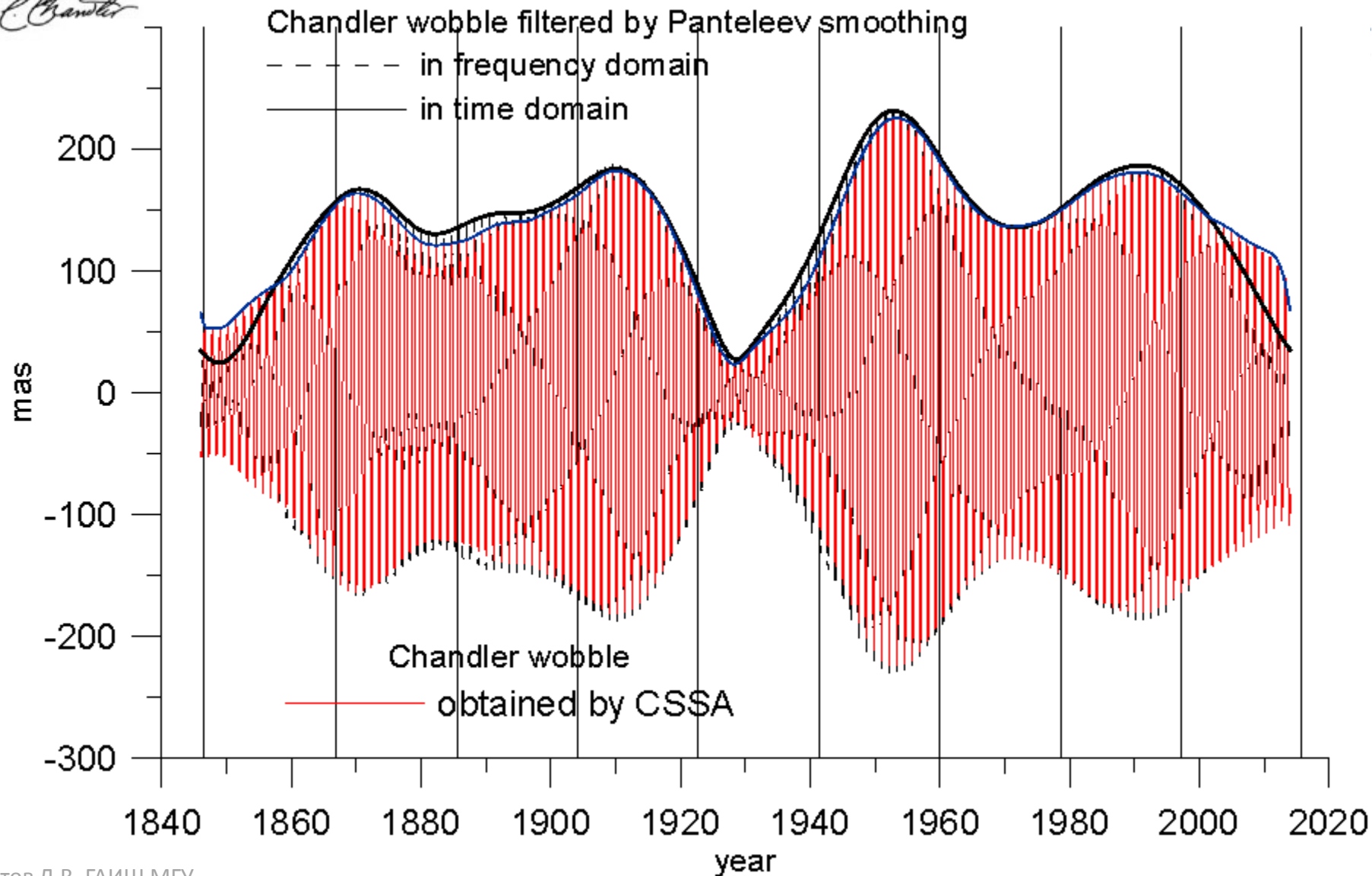


X-компонента (Y – сдвинута на $\pi/2$).

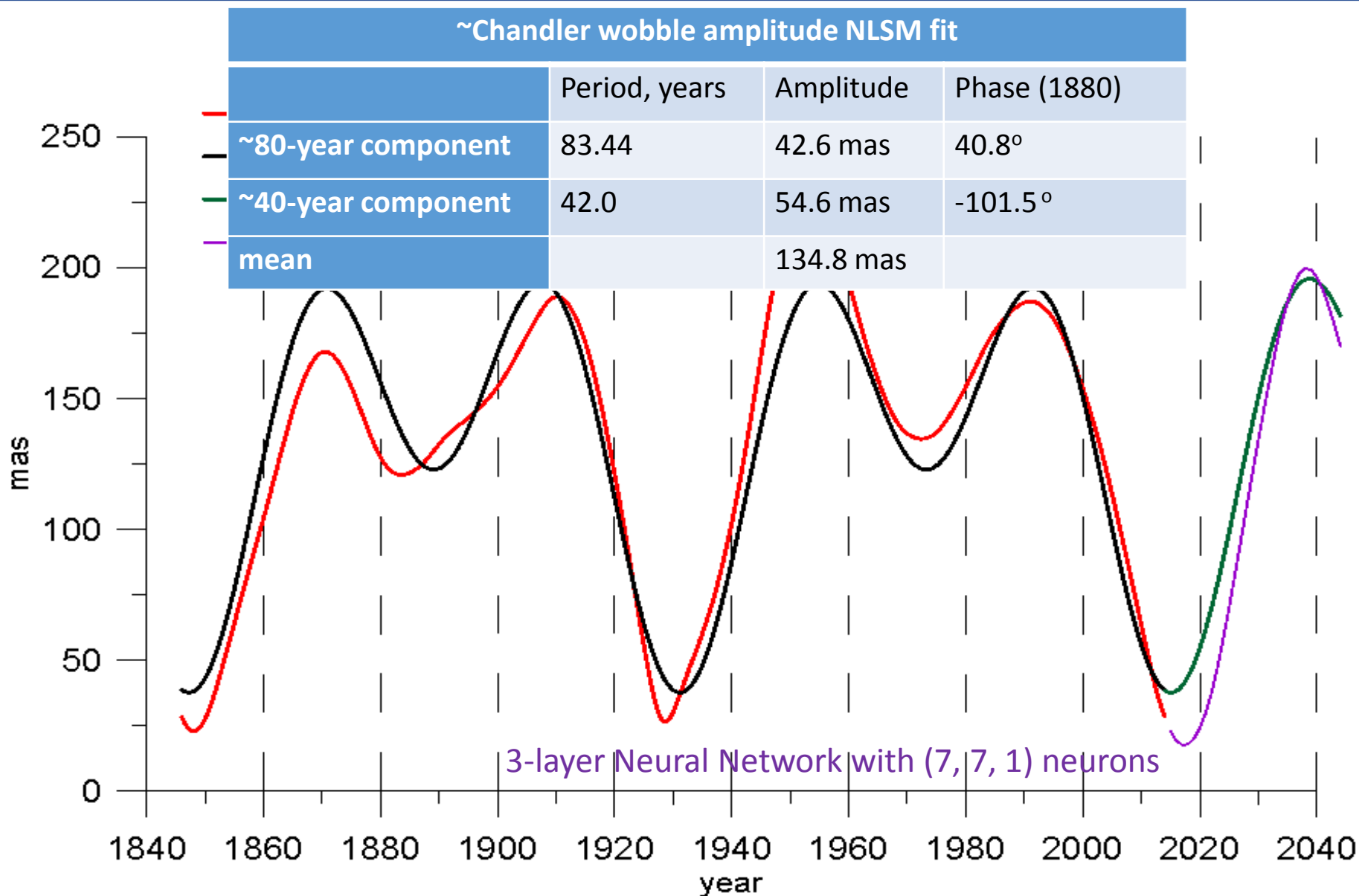


Отфильтрованное Чандлеровское колебание

S. C. Chandler



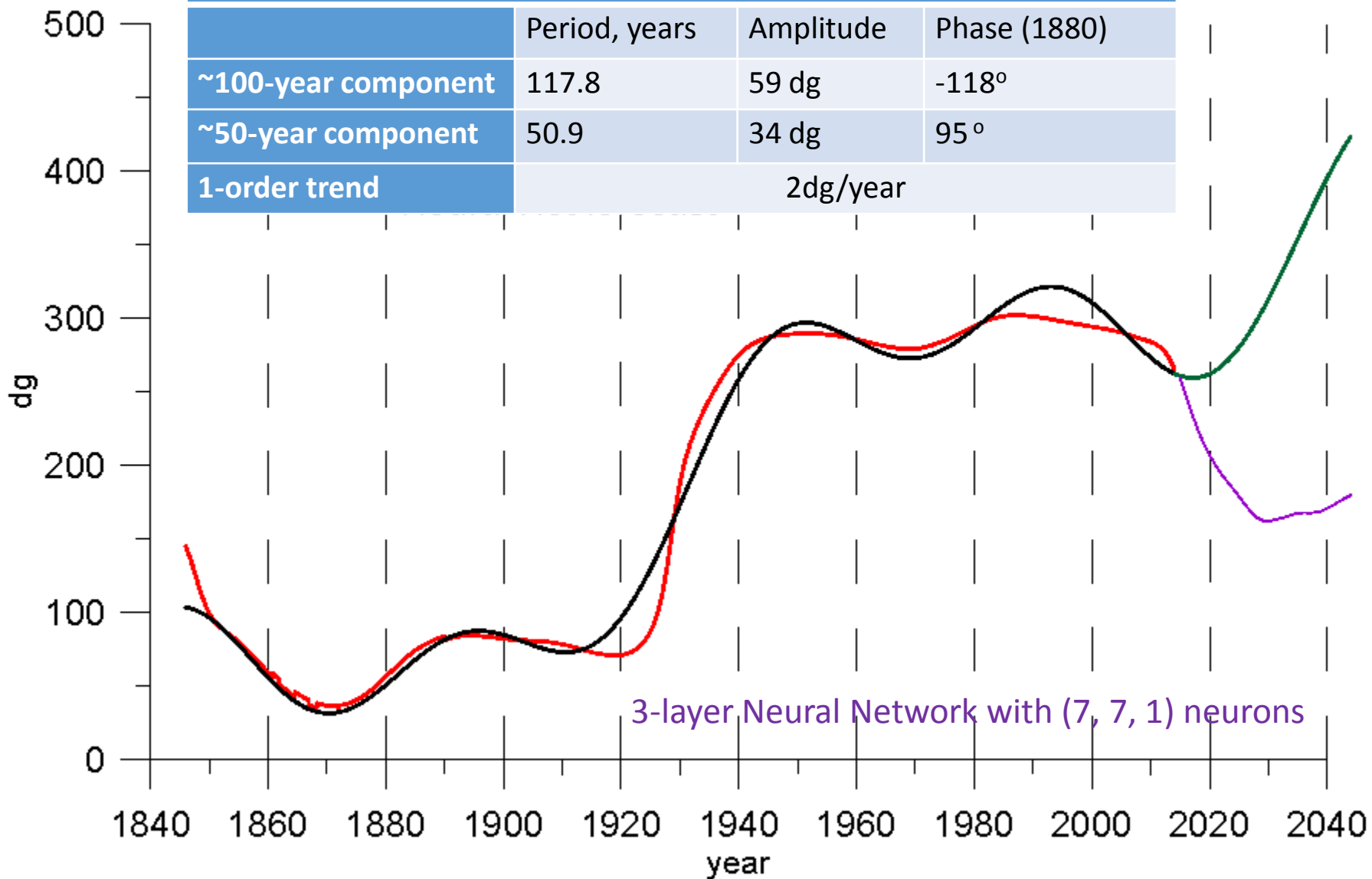
Модель изменений чандлеровской амплитуды



Модель изменений чандлеровской фазы

~Chandler wobble phase NLSM fit

	Period, years	Amplitude	Phase (1880)
~100-year component	117.8	59 dg	-118°
~50-year component	50.9	34 dg	95°
1-order trend	2dg/year		



3-layer Neural Network with (7, 7, 1) neurons

Случай входной частоты колебаний близкой к резонансной

$$\ddot{x} + \omega^2 x = \frac{F}{m} \quad \Leftrightarrow \quad \dot{\xi} - i\omega\xi = \frac{F}{m}$$

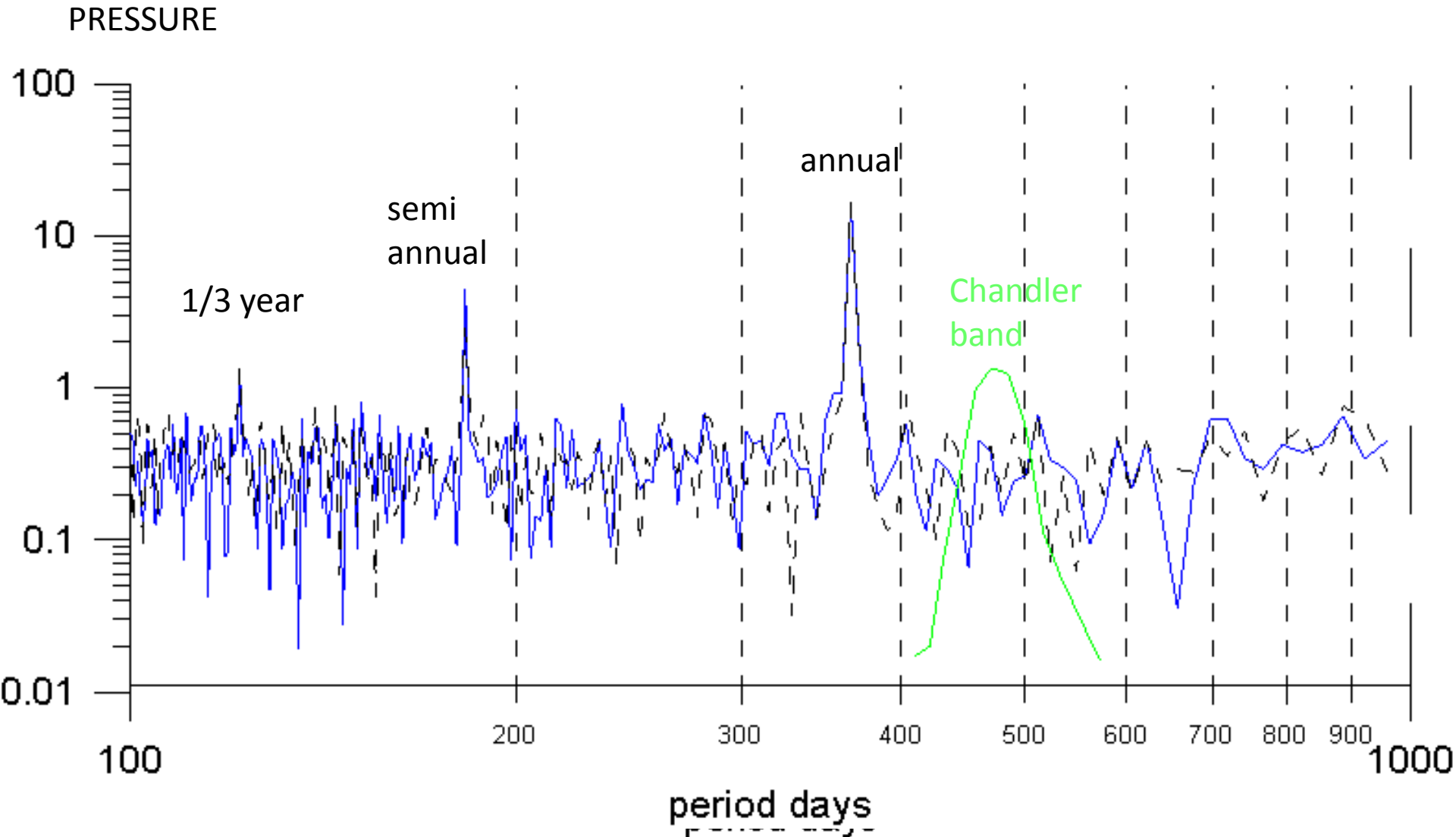
если $\frac{F}{m} = e^{i(\omega+\varepsilon)t}$

то $x = Ae^{i\omega t} + Be^{i(\omega+\varepsilon)t} = (A + Be^{i\varepsilon t})e^{i\omega t}$

~Chandler wobble amplitude change as a result of frequency shift by ε

	Period of modulation, years	Amplitude	$2\pi/\varepsilon$ - period
~80-year component	83.44	42.6 mas	427 days
~40-year component	42.0	54.6 mas	421 days

Спектр ААМ, IV давление



Envelope can be transferred through the dynamical model

$$\frac{i}{\sigma_c} \frac{dm(t)}{dt} + m(t) = \Psi(t)$$

$$m(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}e^{i\omega_c t} \quad \Psi(t) = E(t)e^{i\vartheta(t)}e^{i\omega_c t}$$

$$E(t)e^{i\vartheta(t)}e^{-i\varphi(t)} =$$

$$= \frac{i}{\sigma_c} (\dot{A}(t) + i\dot{\varphi}(t)A(t)) + \left(1 - \frac{\omega_c}{\sigma_c}\right) A(t)$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad \sigma_c = 2\pi f_c (1 + i/2Q) \quad f_c = \frac{1}{433} \text{ days}^{-1} \quad Q = 175$$

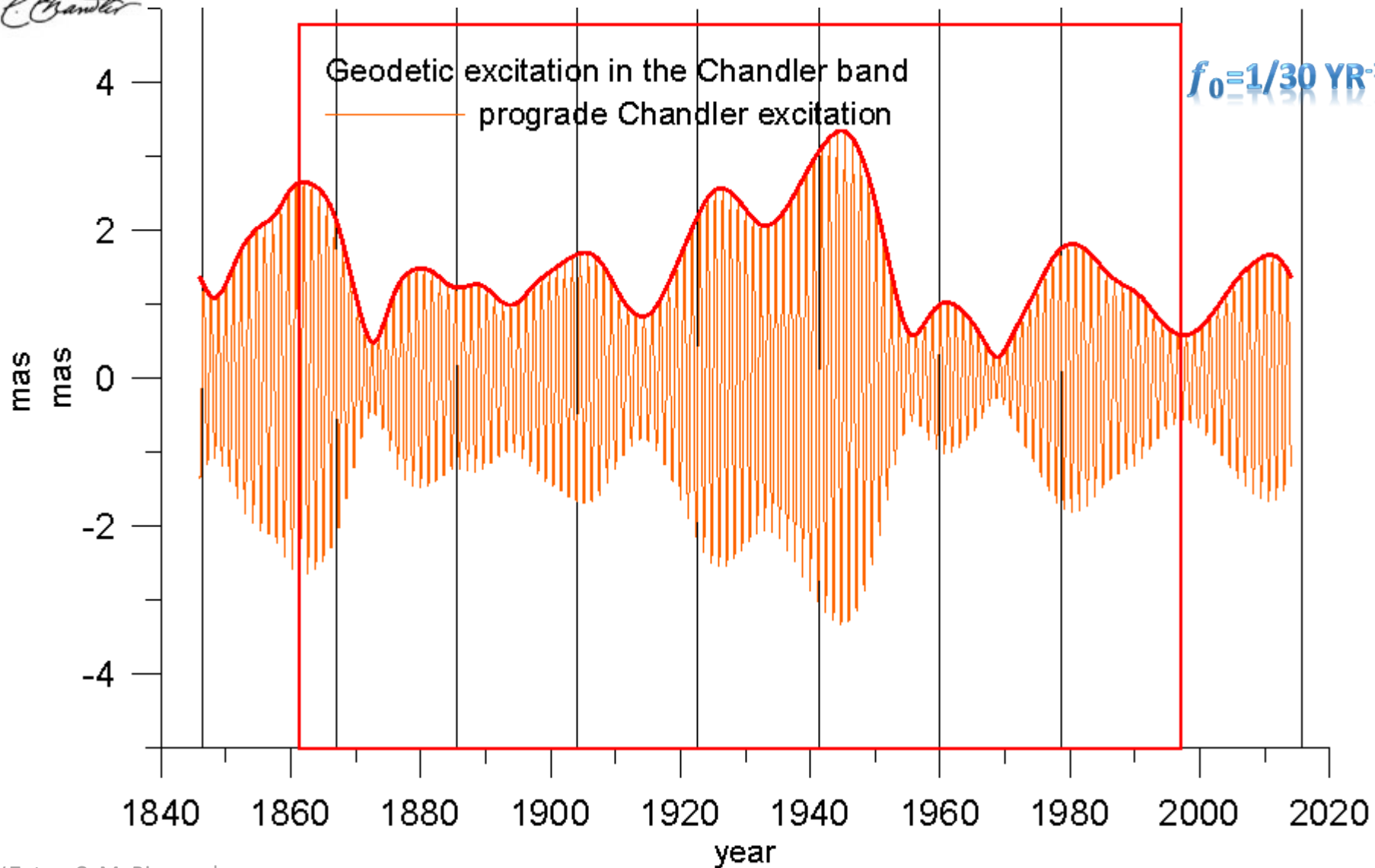


Входное Чандлеровское

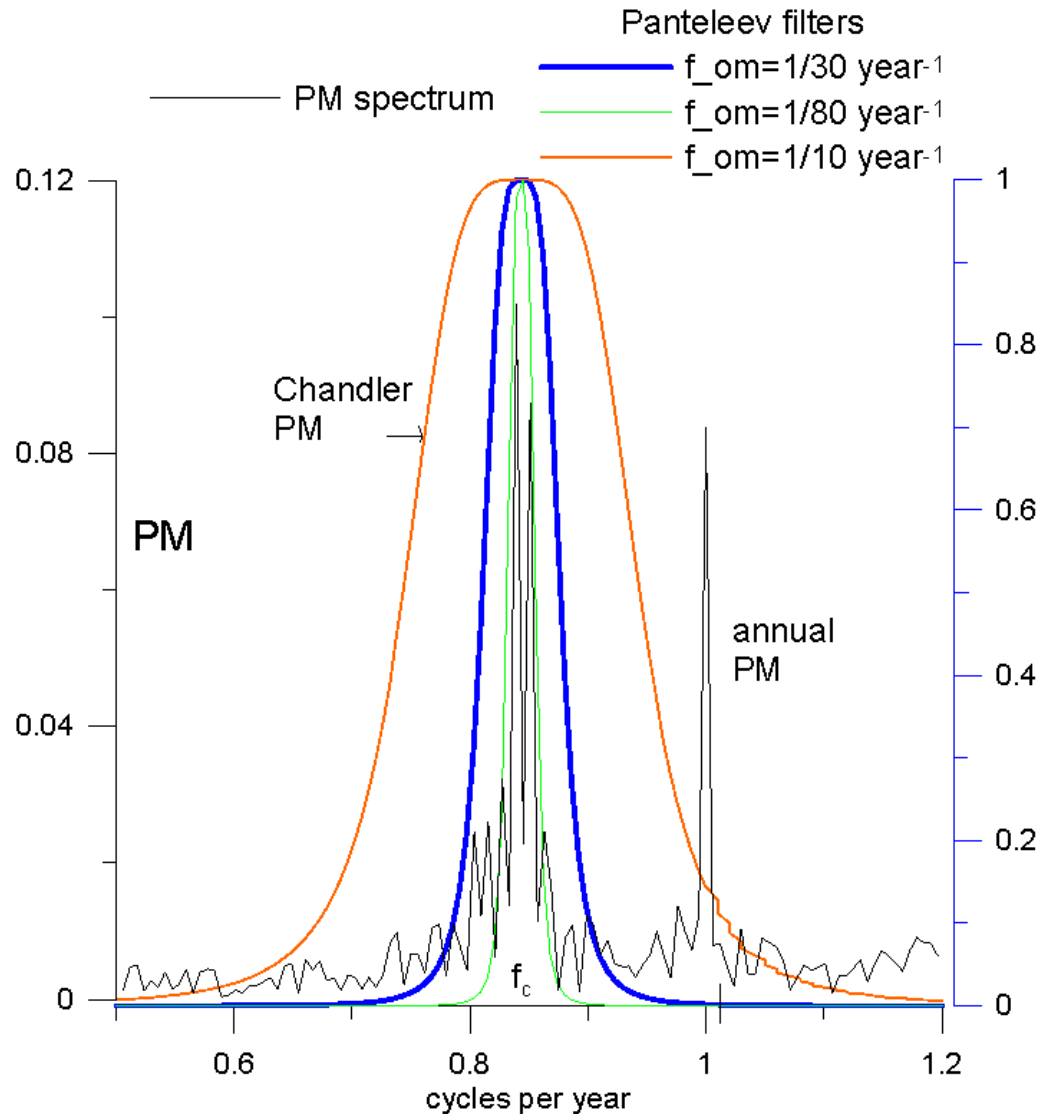
возбуждение

X-component (Y – similar, with $\pi/2$ phase shift).

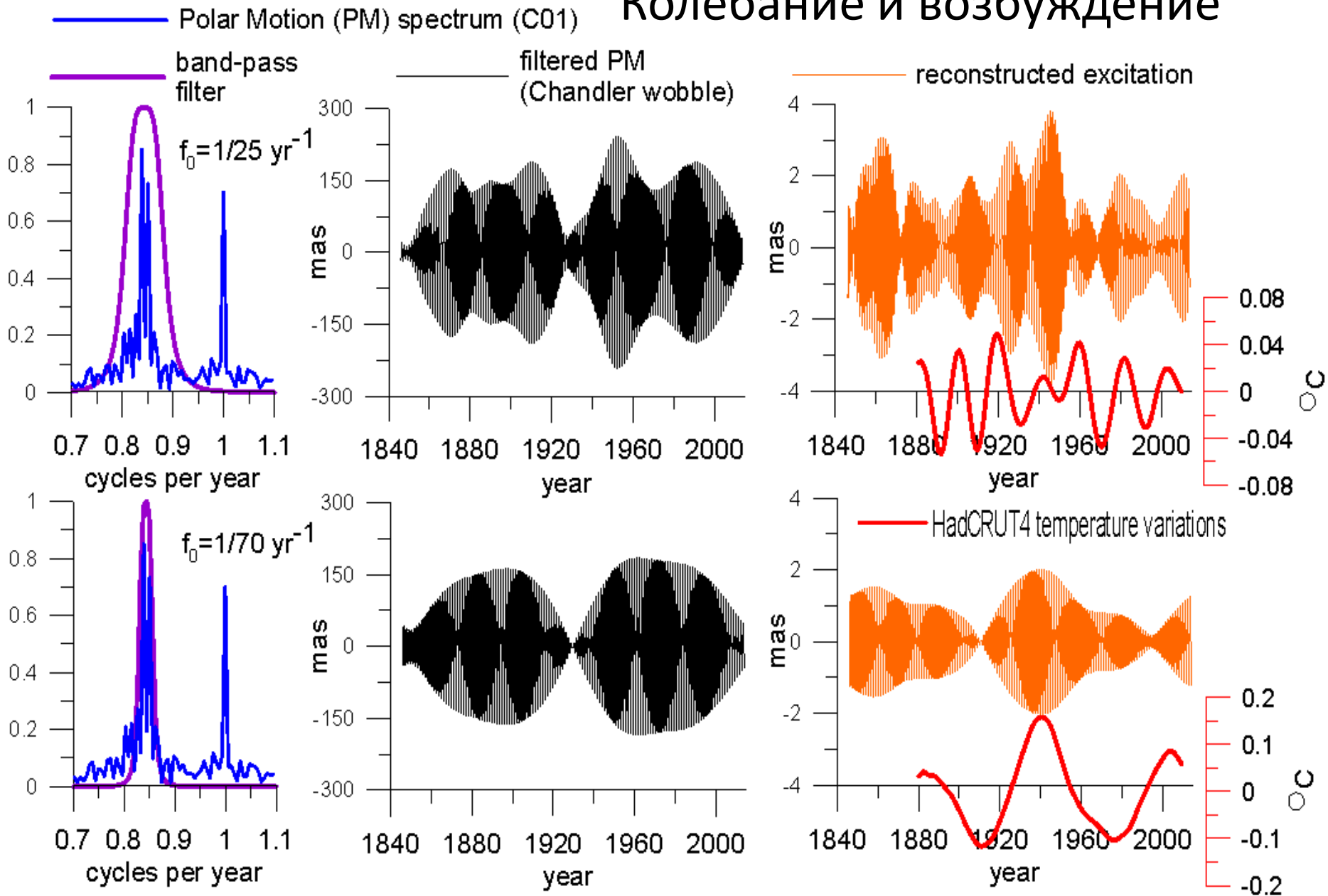
S. C. Chandler



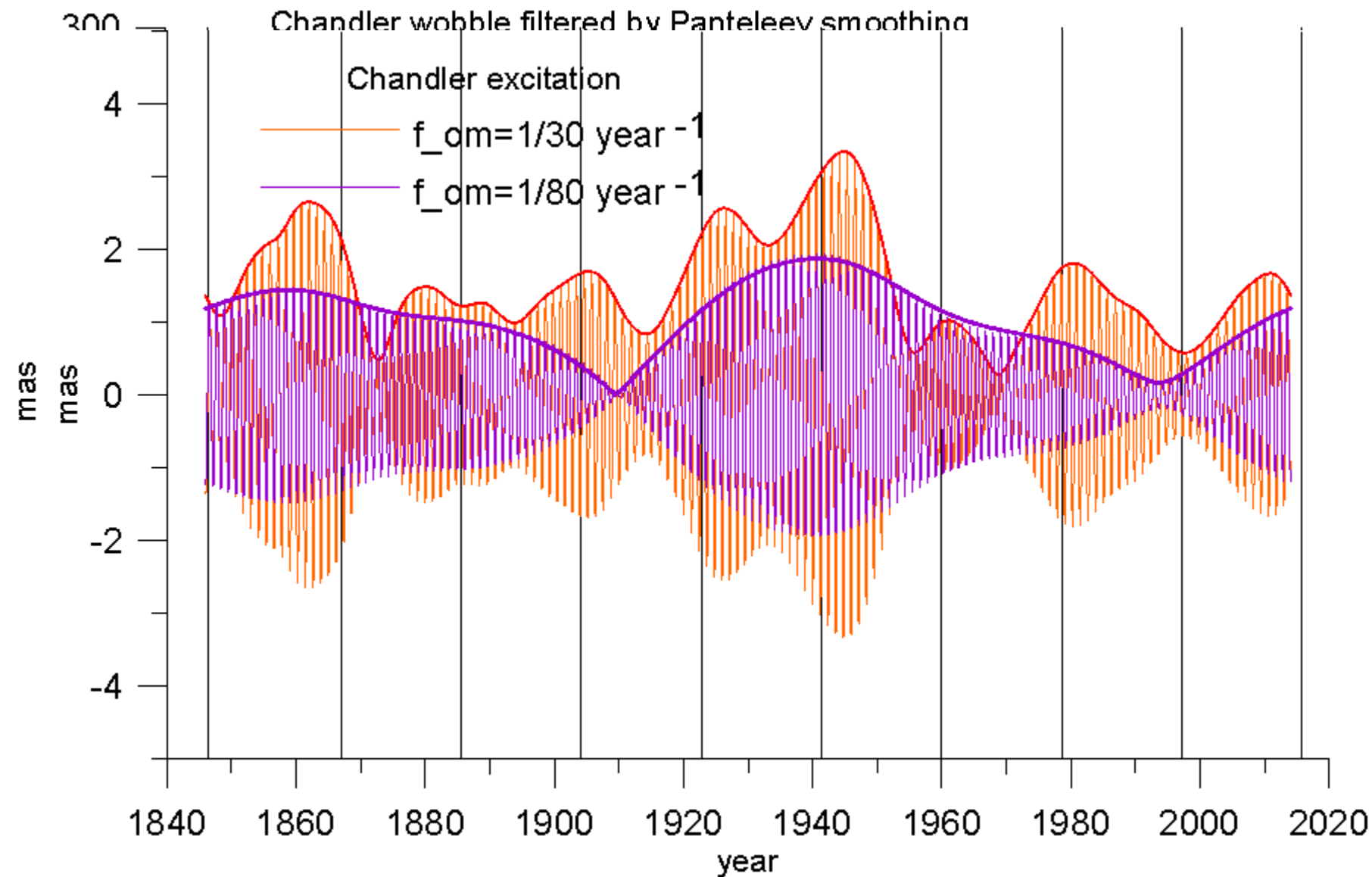
Спектр движения полюса и фильтр Пантелеева в Чандлеровском диапазоне



Колебание и возбуждение

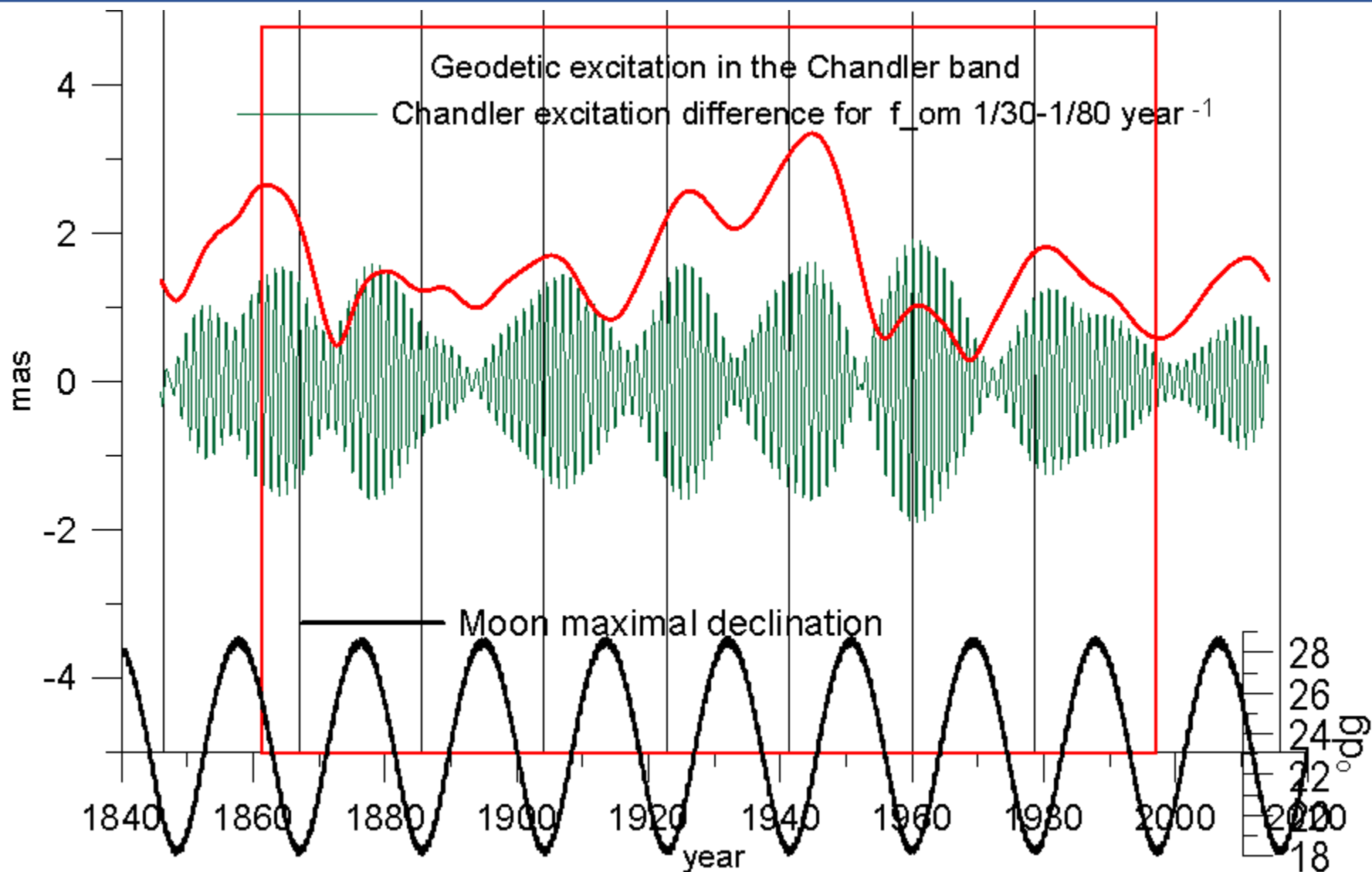


Возбуждение Чандлеровского колебания



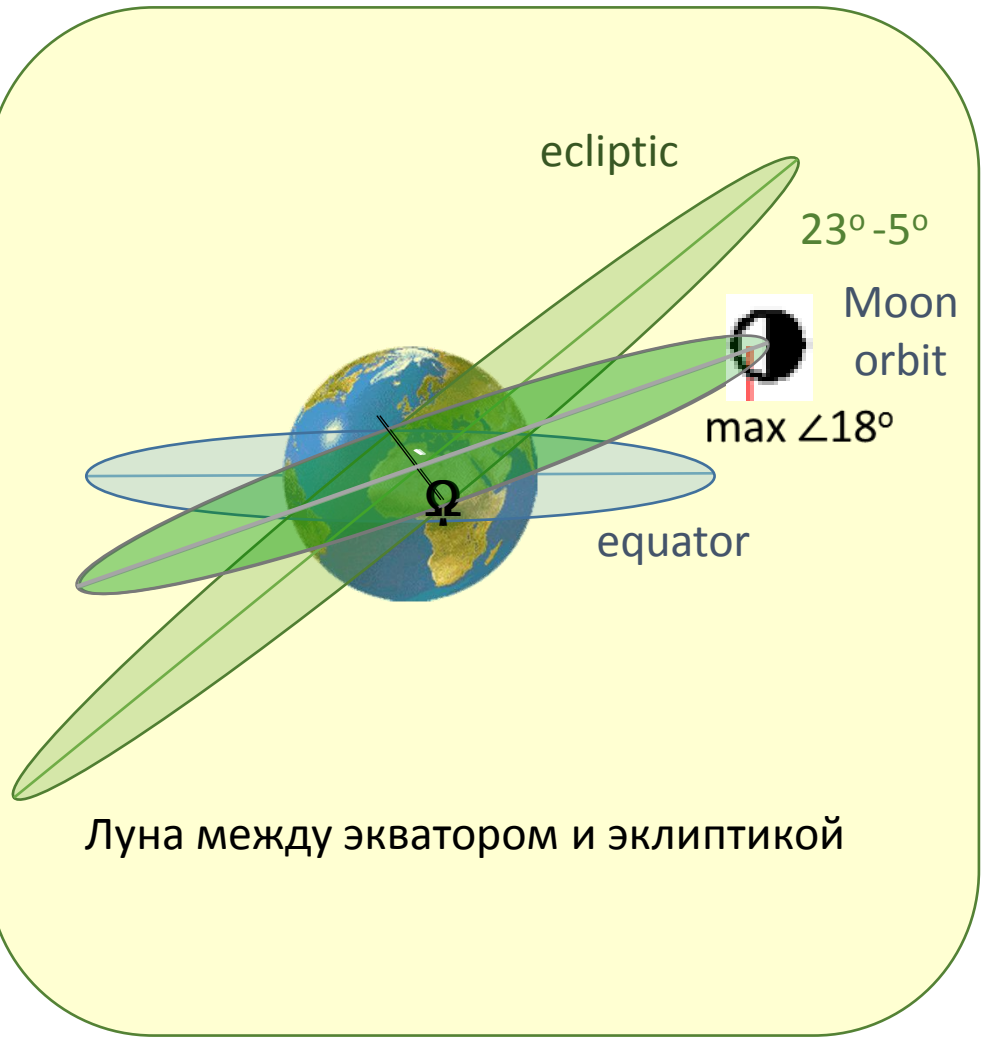
X-component (Y – similar, with $\pi/2$ phase shift)

20-летняя компонента Чандлеровского возбуждения



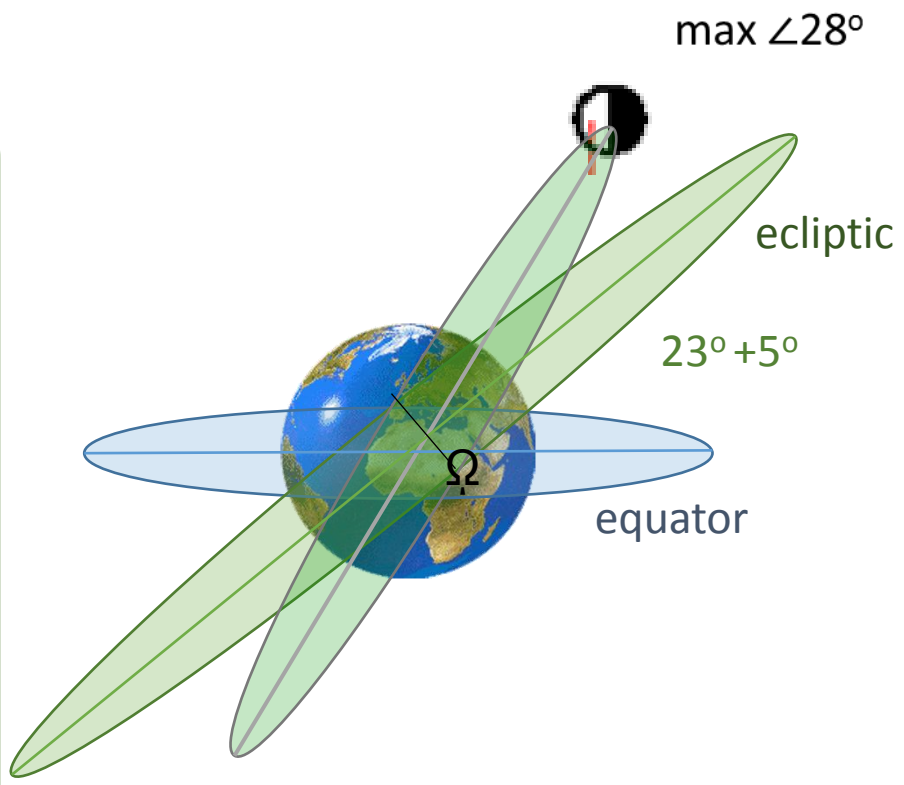
Вдоль оси абсцисс показана 18.6-летний цикл изменения максимальных
склонений Луны

18.6 – летний цикл регрессии узлов орбиты Луны



Луна между экватором и эклиптикой

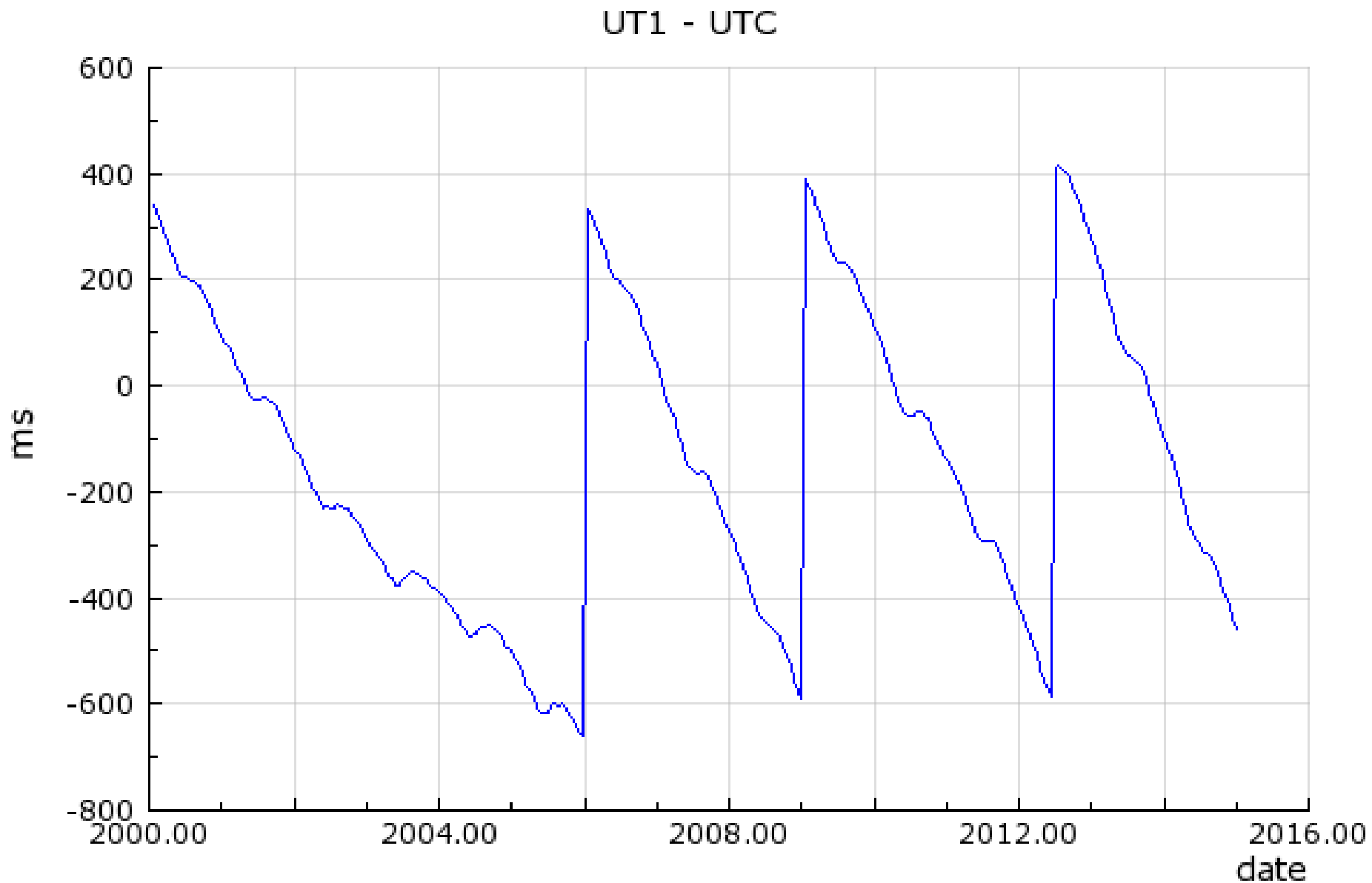
1997,
2015



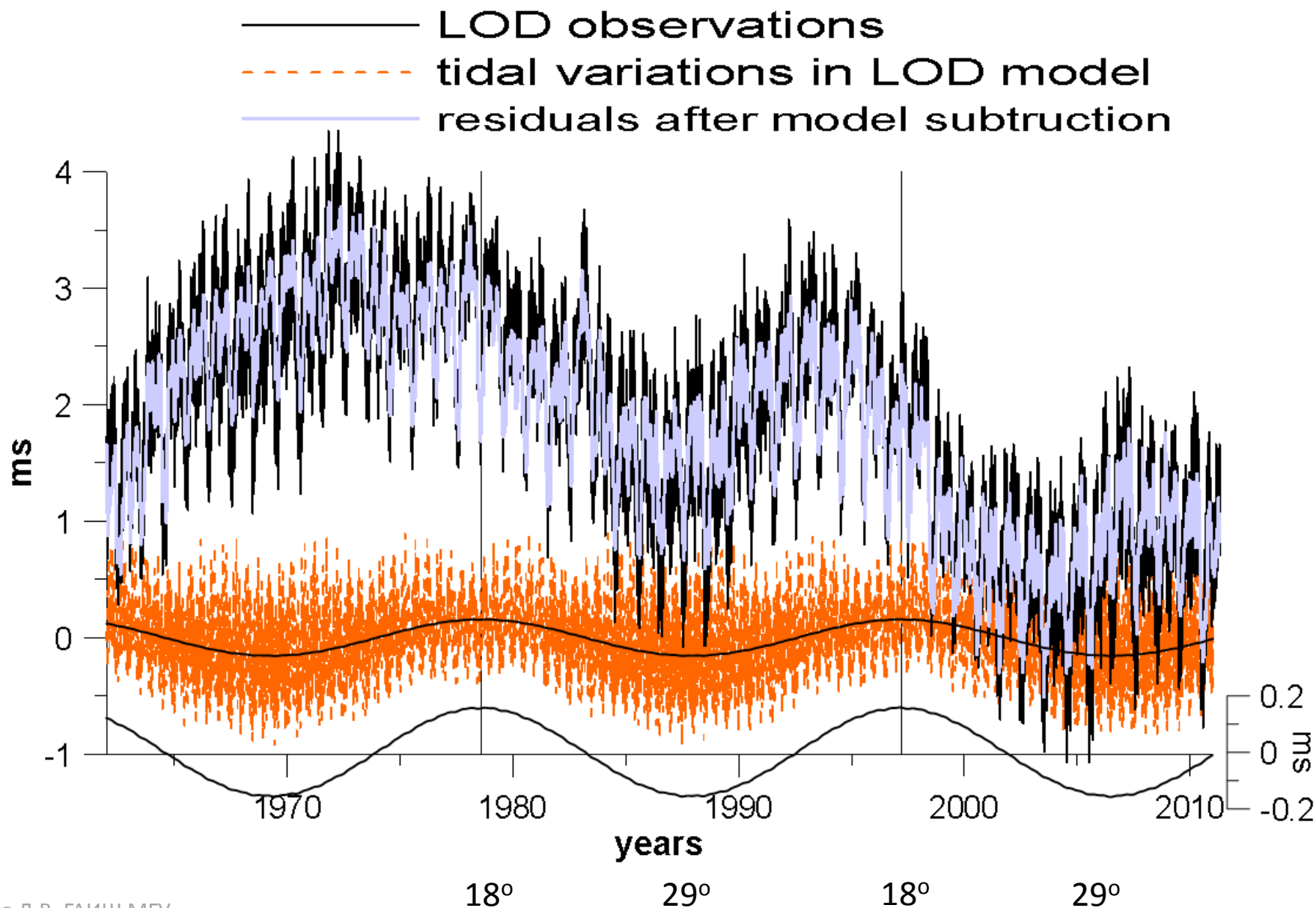
Луна выше эклиптики

1988,
2007

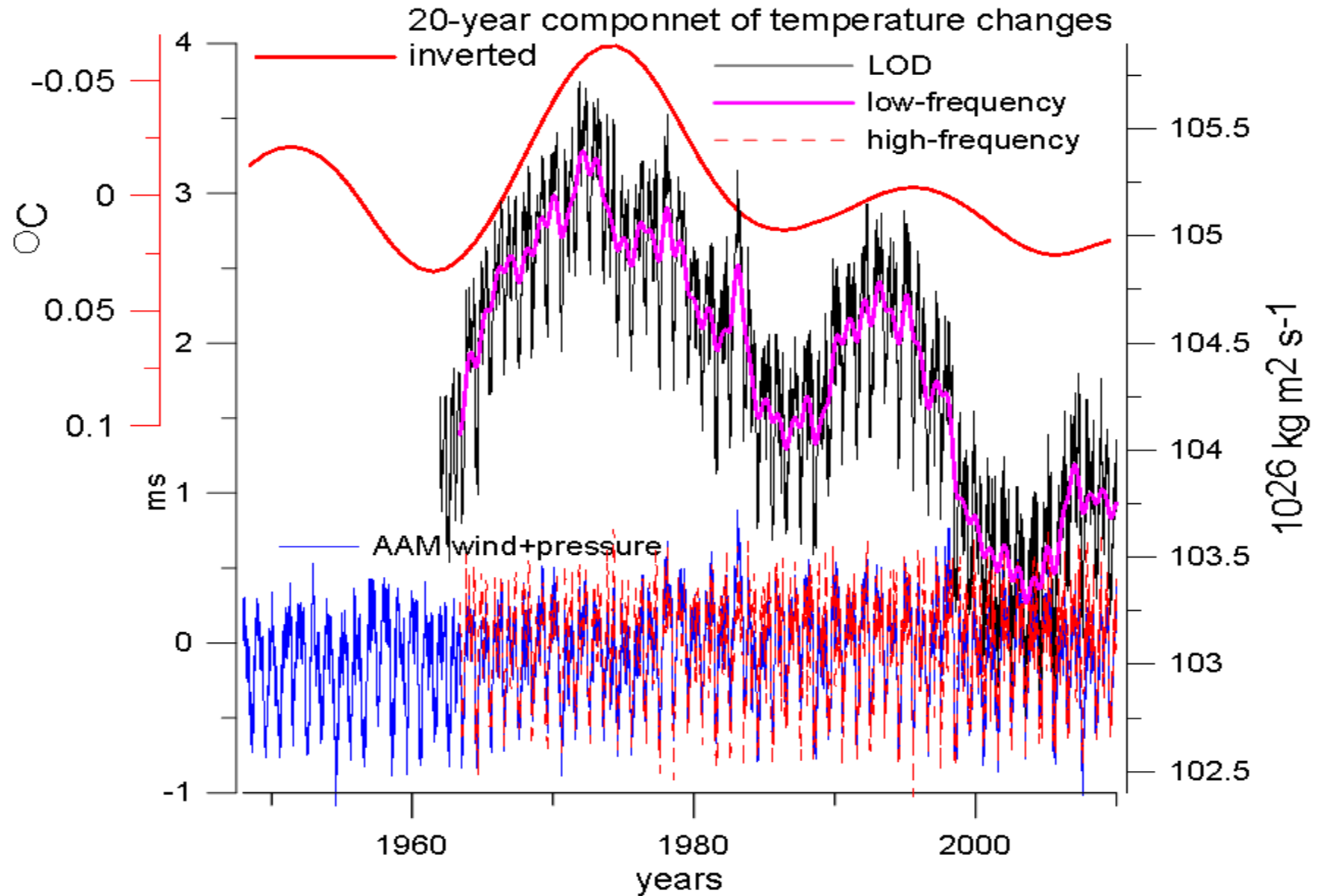
А как там с длительностью суток?



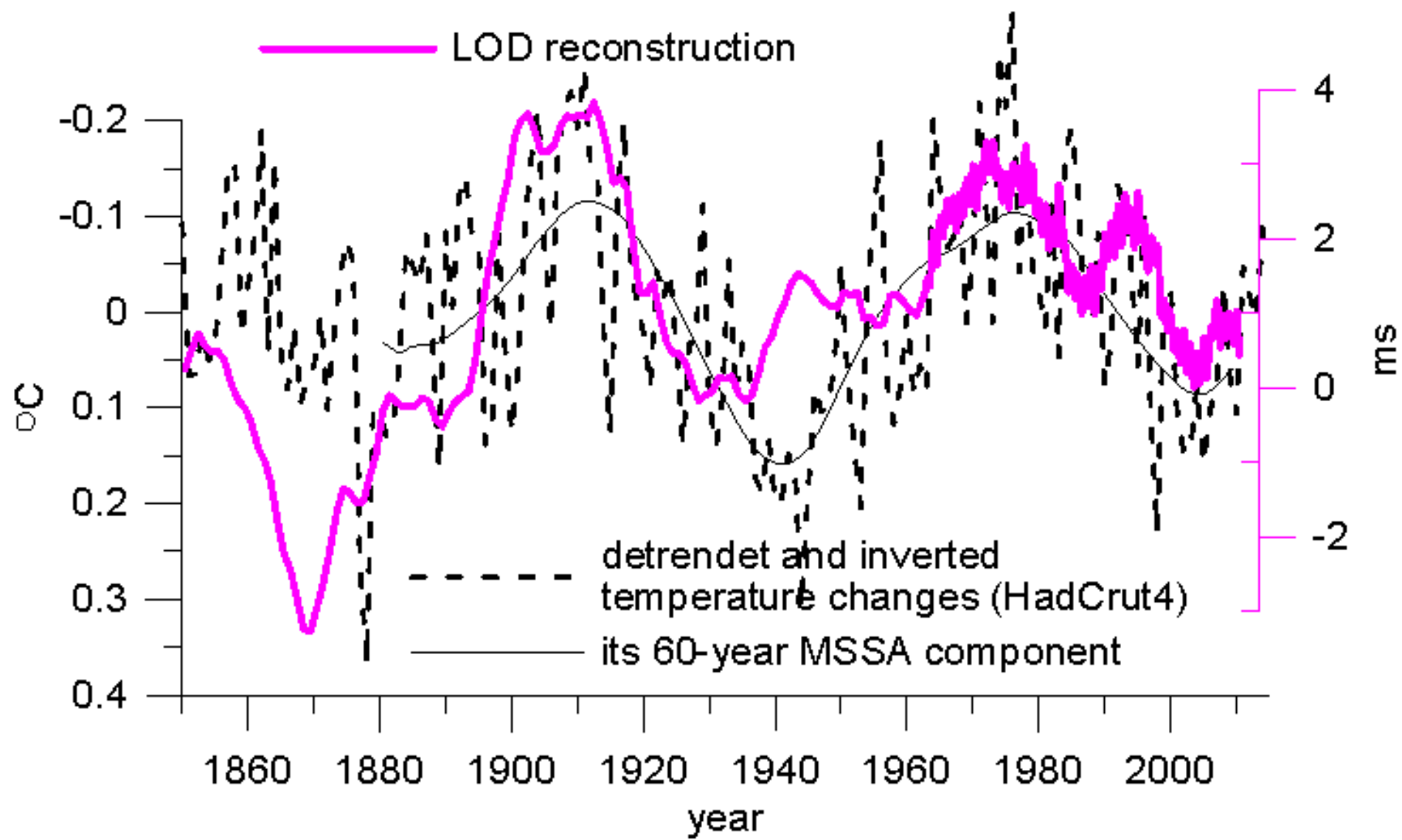
Изменения продолжительности суток (LOD)



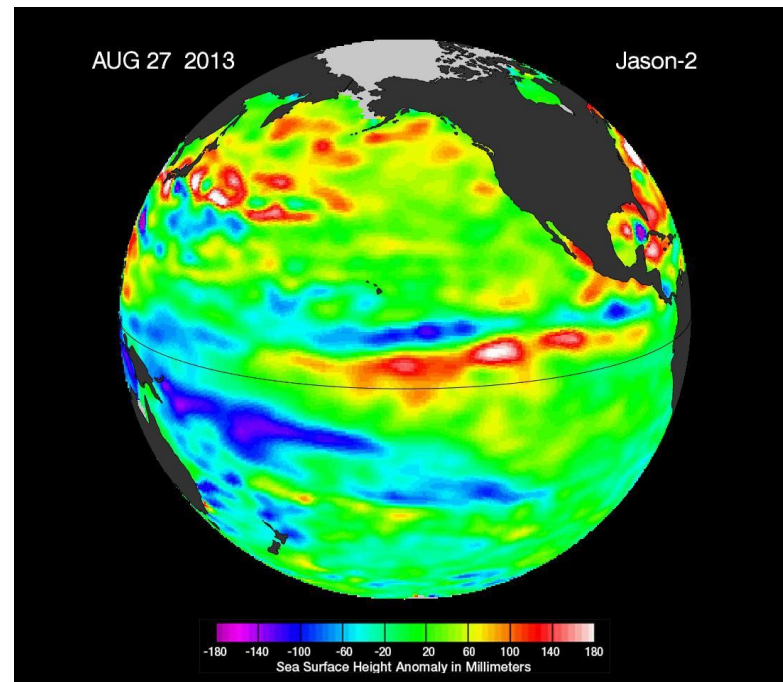
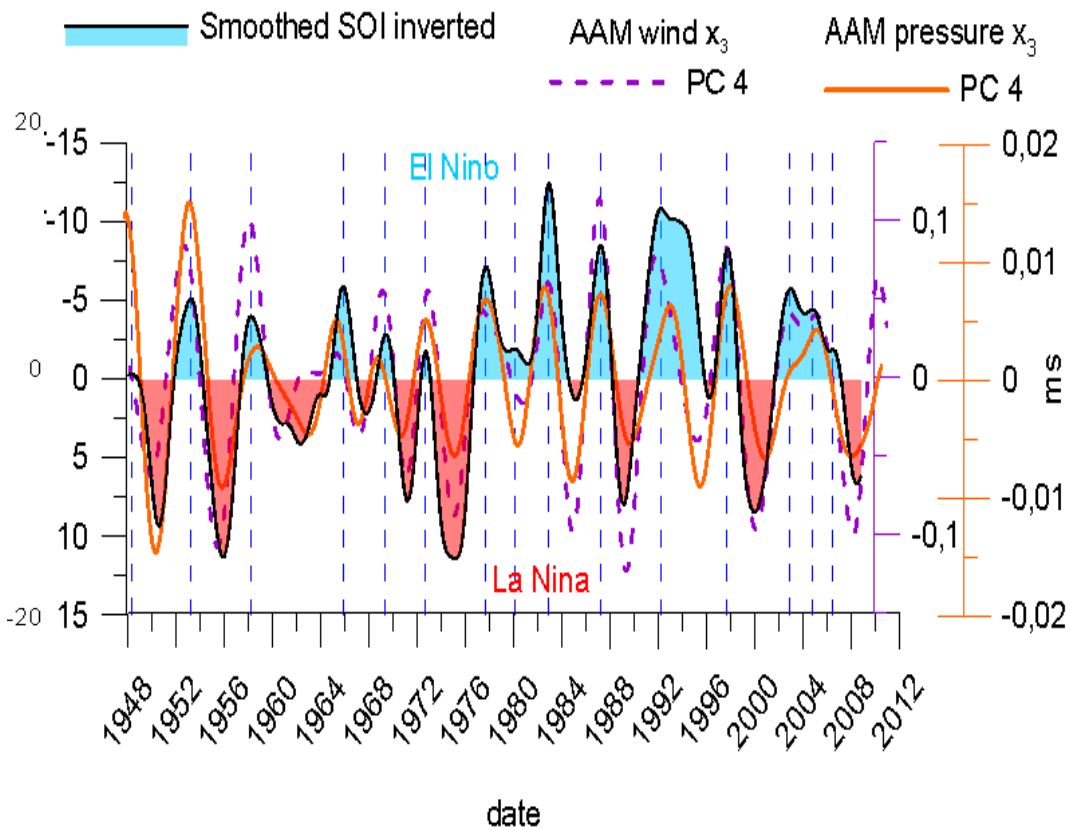
Кратковременные вариации LOD температуры



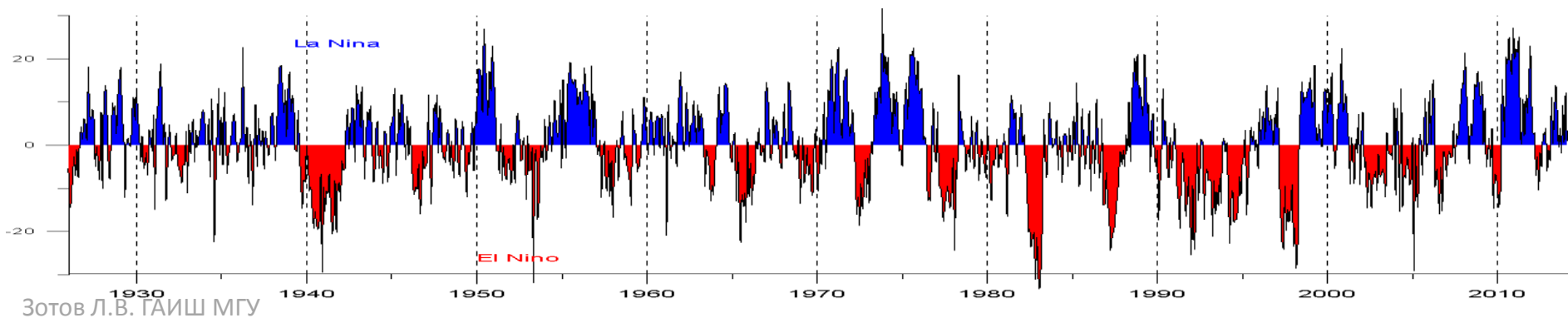
Долговременные вариации в температуре и LOD

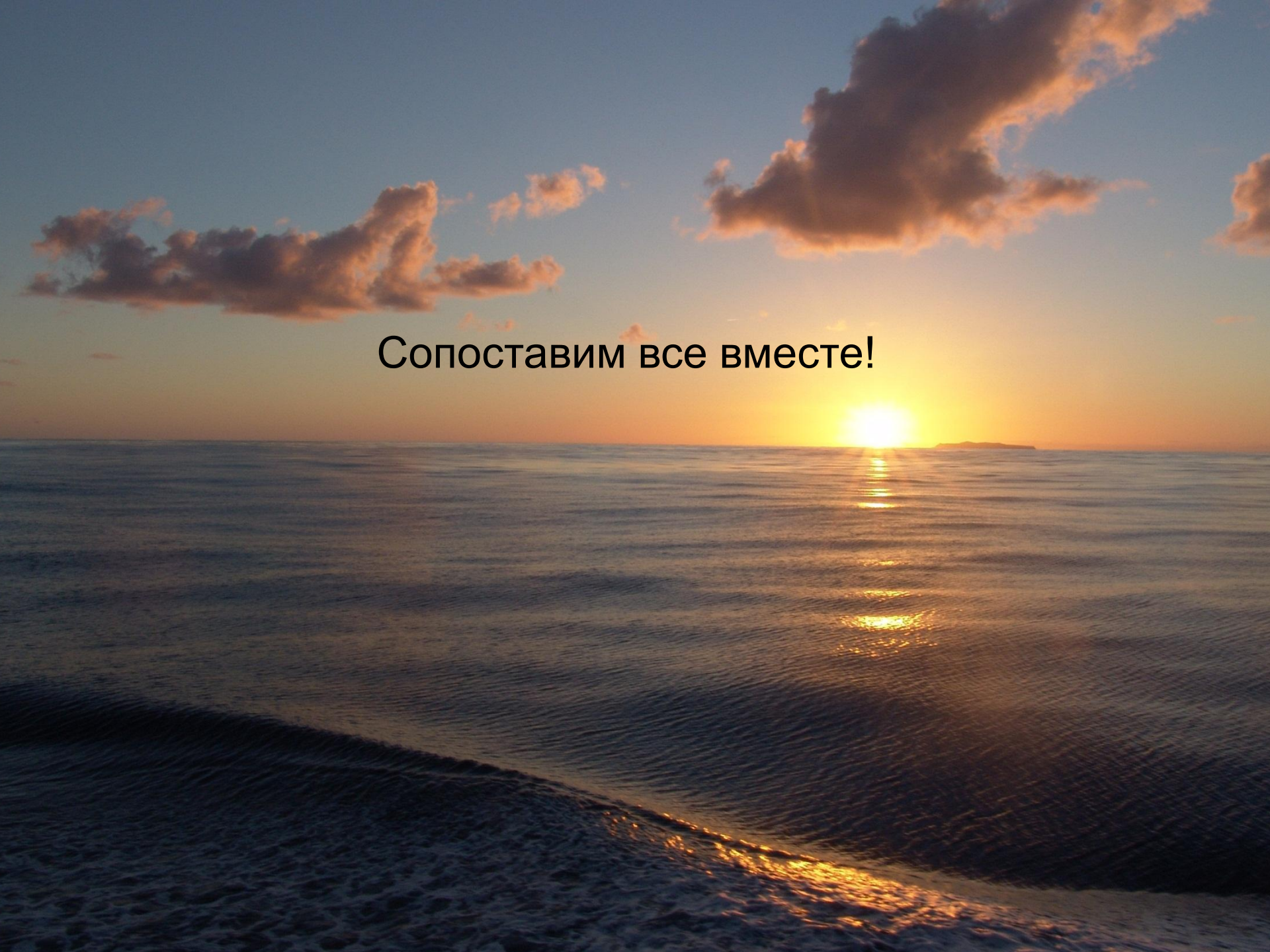


El-Nino, AAM and LOD



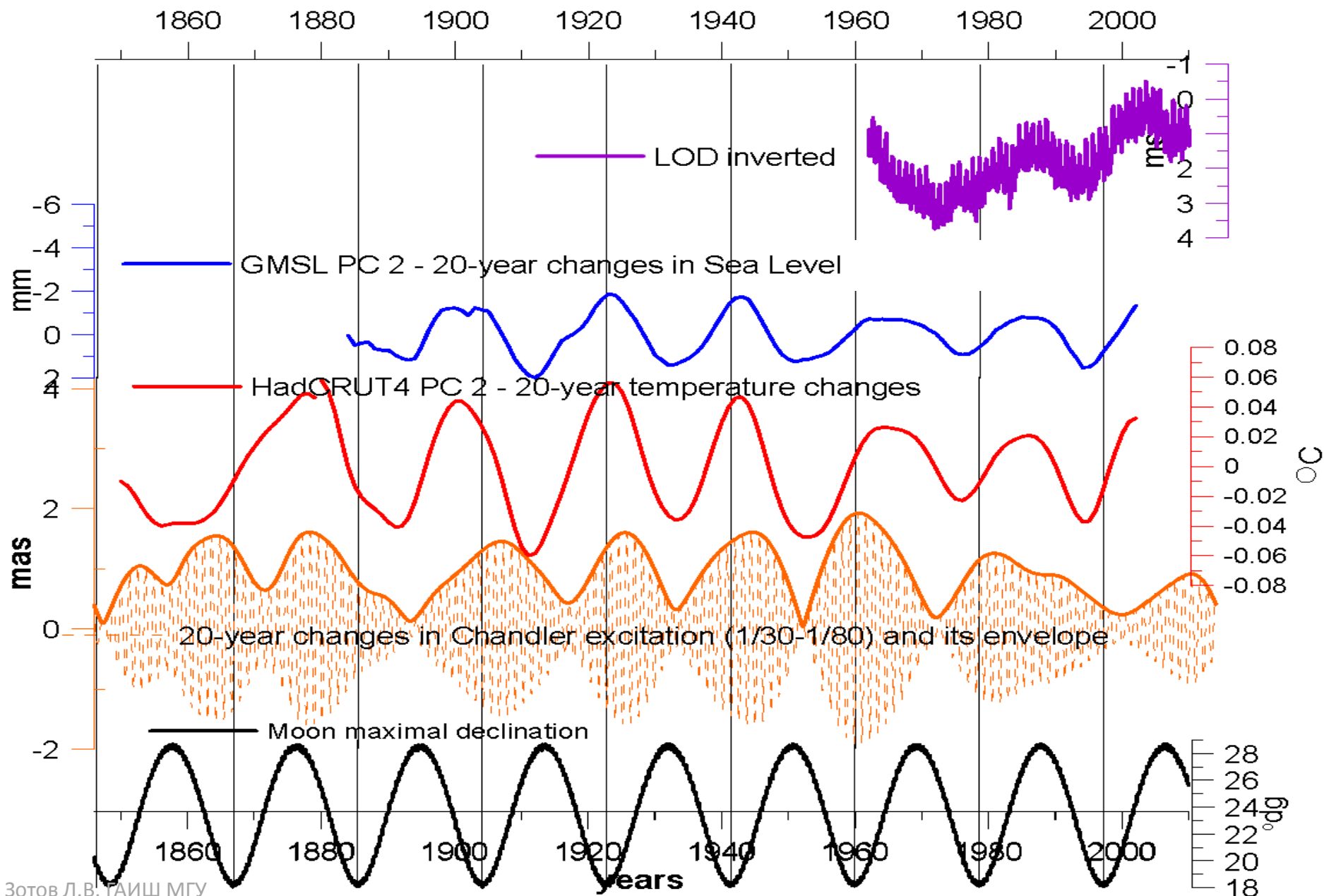
La Nada



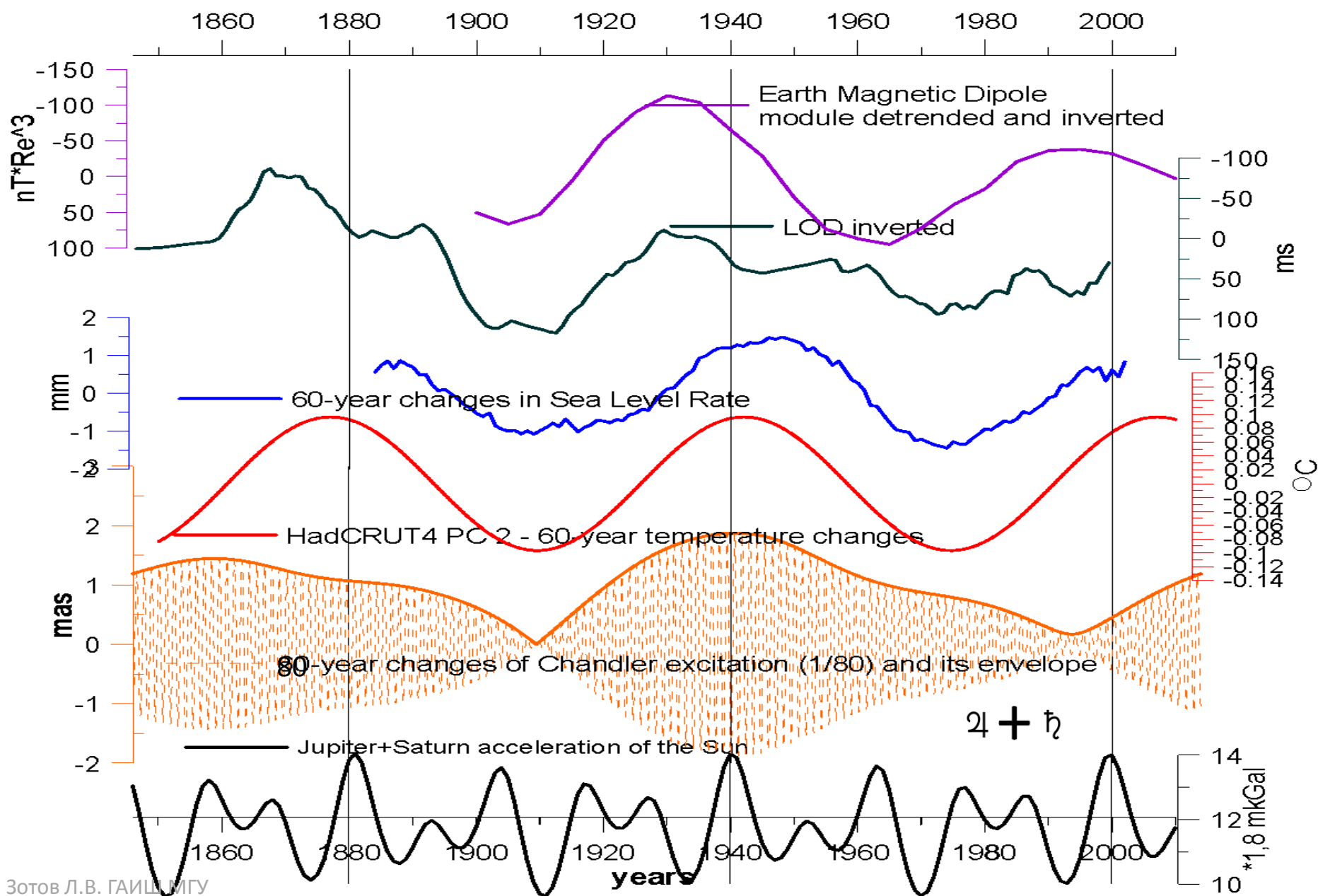
A photograph of a sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, creating a bright orange and yellow glow that reflects on the water's surface. The sky is a mix of blue and orange, with several large, dark clouds scattered across it. The water in the foreground is dark blue with gentle ripples.

Сопоставим все вместе!

20-летние изменения SL, LOD, T и Чандлеровского колебания



60-летние изменения SL, LOD, MD, T и Чандлеровского колебания



Могут ли изменения климата
влиять на вращение Земли ?

Может ли вращение Земли
влиять на климат ?

Может ли внешний фактор
влиять на них обоих ?

Изменения во вращении Земли обусловлены



Выводы

- Проявляются изменения амплитуды Чандлеровского колебания с квази-периодами ~ 80 и ~ 40 лет
- Из-за их наложения мы переживаем эпоху малой амплитуды Чандлеровского колебания как и в 1930х годах
- Изменения глобальной температуры и уровня моря содержат ~ 70 и ~ 20 -летние вариации, сходные с колебаниями LOD и Чандлеровского возбуждения
- 20-летние колебания могут быть связаны с 18.6-летней прецессией лунной орбиты, в ходе которой меняется сила прилива, диссипация энергии, циркуляция и перемешивание океана и атмосферы и, вероятно, процессы в недрах Земли
- Не исключено, что пауза в глобальном потеплении и в активности El Niño связана с торможением вращения Земли и минимумом Чандлеровского колебания
- Выявленные сходства могут быть полезны для прогнозирования

Спасибо за внимание

Момент импульса атмосферы

Atmospheric Angular Momentum

Н.С.Сидоренков, К.Бизуар, Л.В.Зотов, Д.Салстейн

Атмосфера, удерживаемая силой притяжения Земли, вращается относительно земной поверхности. Физической характеристикой этого движения служит момент импульса атмосферы; его анализ дает возможность составить представление о кинематике циркуляции воздуха и протекающих в нем процессах.

Модель

Воздушные массы движутся вдоль земной поверхности, которая имеет сферическую форму с кривизной, равной радиусу Земли R . На малых масштабах ($l \ll R$) кривизной земной поверхности можно пренебречь, движение масс рассматривать как плоскопараллельное; для его описания достаточно использовать закон сохранения импульса. На мас-

шштабном же есть переносной момент импульса атмосферы, возникающий из-за твердотельного вращения атмосферы вместе с Землей со скоростью Ω . Второе слагаемое характеризует движения воздуха относительно неподвижной земной поверхности, т.е. ветер, поэтому h называют моментом импульса ветров. Изменения абсолютного момента импульса атмосферы возникают, во-первых, из-за вариаций компонентов тензора инерции атмосферы (в результате перераспределения воздушных и водных масс) и, во-вторых, из-за колебаний компонентов момента импульса ветров. В книгах [1, 2] показано, что вклад последнего фактора в изменения момента импульса Земли в несколько раз превышает вклад первого. Соответственно, в дальнейшем мы сосредоточимся на вариациях момента импульса ветров.

Будем пользоваться земной системой координат



Николай Сергеевич Сидоренков, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией планетарной циркуляции и гелиогеофизических исследований Гидрометцентра России. Основные работы посвящены исследованиям неравномерности вращения Земли, движения полюсов и глобальных геофизических процессов. Неоднократно публиковался в «Природе».



Кристиан Бизуар (Christian Bizouard), доктор астрономии, сотрудник Службы вращения Земли Парижской обсерватории. Занимается изучением вращения Земли, движения полюсов, прецессии, нутации и геофизических возмущений.



Леонид Валентинович Зотов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Область научных интересов — вращение Земли, гравитационное поле, климатические изменения, методы обработки данных.



Дэвид Салстейн (David Salstein), доктор метеорологии, работает в системе «Исследование атмосферы и окружающей среды» (AER) США, директор Специального бюро атмосферного углового момента Международной службы вращения Земли и систем отсчета (IERS). Руководит оперативными вычислениями момента импульса атмосферы. Исследует атмосферную циркуляцию, динамику системы Земли и изменения климата.

Some energetic estimates

Annual rate of tidal energy dissipation

$5 \cdot 10^{22}$ rad/sec²

Distance to the Moon increase

4 cm/yr

Gravitational energy supply

$4 \cdot 10^{19}$ erg/s

Chandler energy dissipation

$2 \cdot 10^{13}$ erg/s

Axial AAM variations

10^{22} erg/s

1 erg/s \sim 3 J/year

Upper ocean heat increase $\sim 0.1^\circ$,

Total heating energy

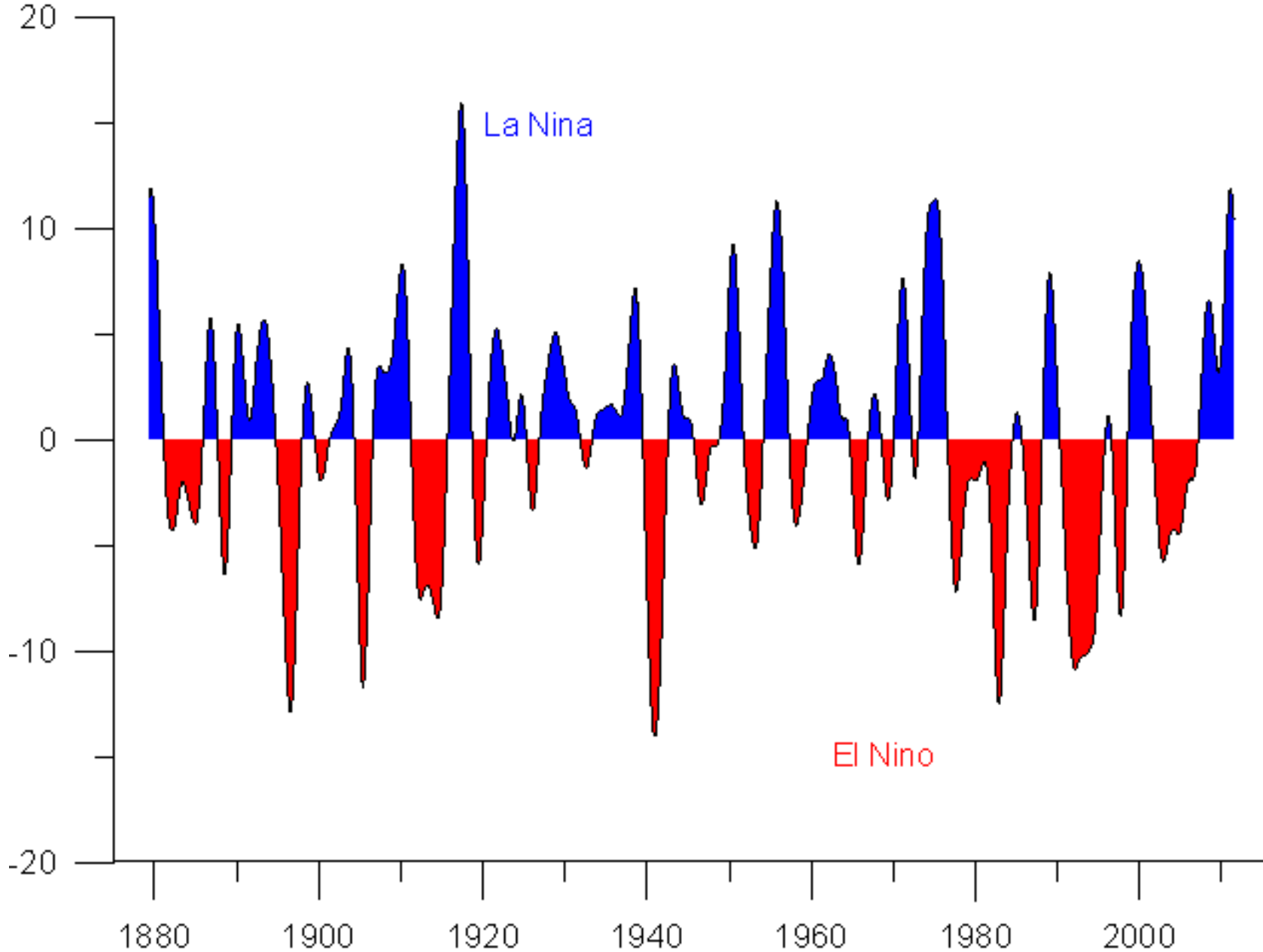
10^{23} J per 50 years

Solar Energy, absorbed by

Earth, Ocean and Atmosphere

$\sim 4 \cdot 10^{24}$ J per year

ENSO



Передаточные функции фильтра и обратного оператора

