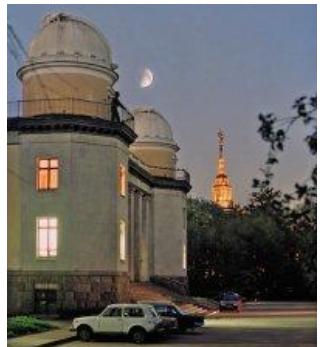


# **Двадцать третья международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

**Могут ли данные космической гравиметрии  
GRACE и GRACE-FO объяснить аномалии  
вращения Земли последних лет?**

Зотов Л.В.<sup>1,2</sup> Фролова Н.Л.<sup>3</sup>, Орехова А.А.<sup>4</sup>

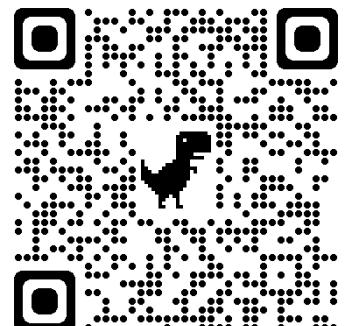


<sup>1</sup>ГАИШ МГУ <sup>2</sup>МИЭМ НИУ ВШЭ

<sup>3</sup>Географический ф-т МГУ <sup>4</sup>Бакинский филиал МГУ

ИКИ РАН

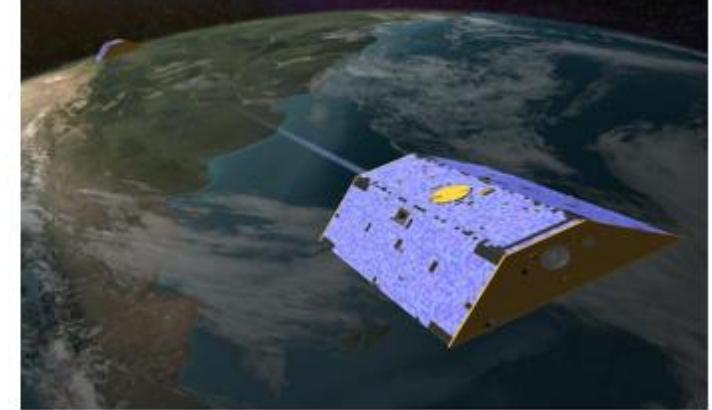
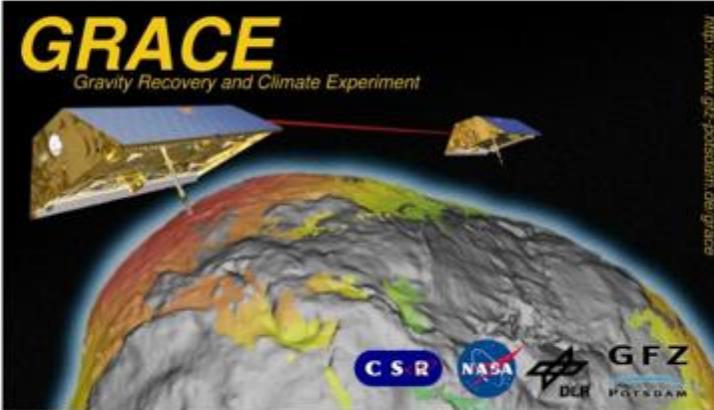
12 ноября 2025 г



## Гравиметрия

---

# GRACE и GFO



GRACE — совместная спутниковая миссия NASA и DLR, направленная на изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций.

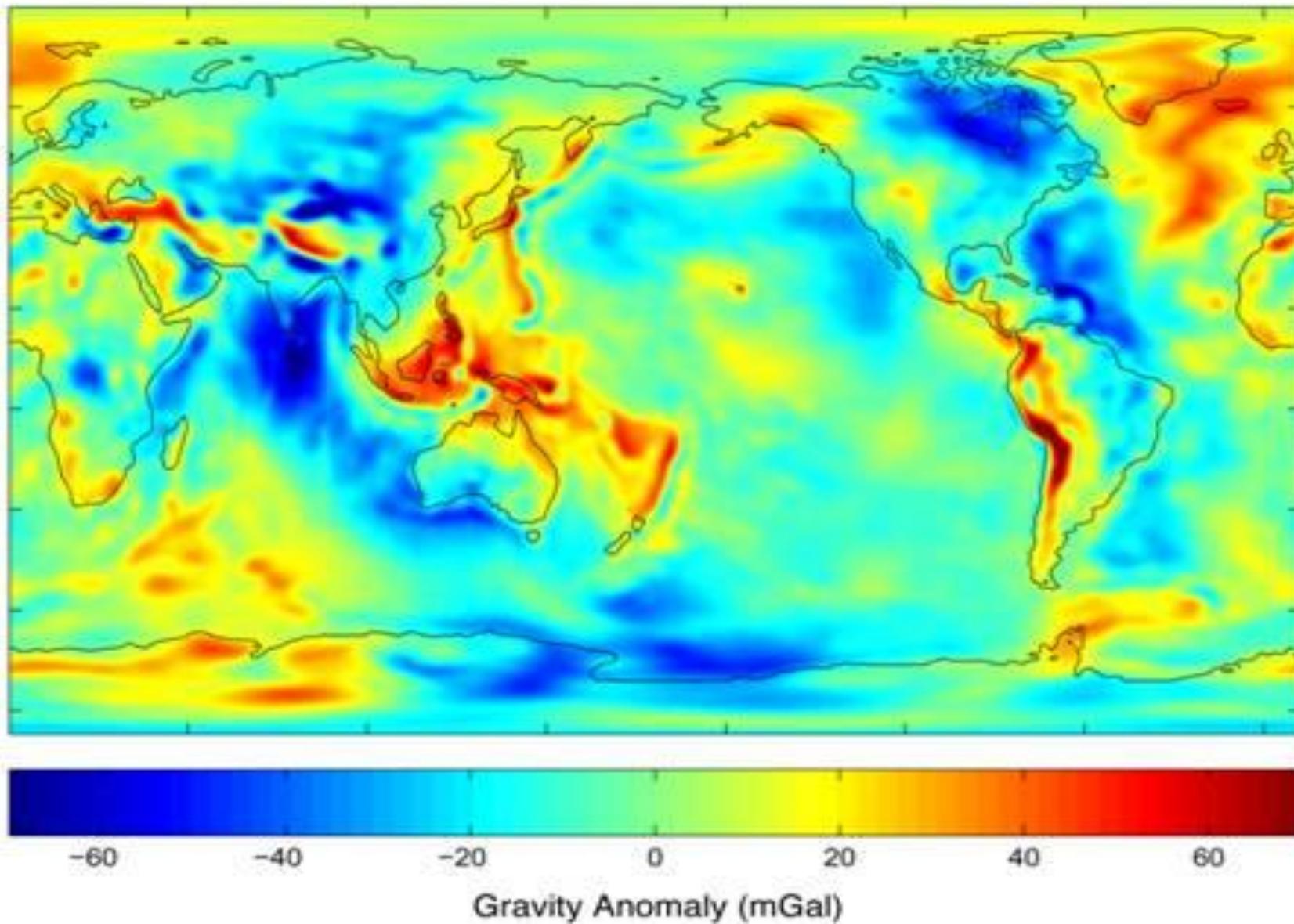
Запущенные в 2002 г. спутники GRACE картографируют гравитационное поле, измеряя положение двух идентичных спутников, находящихся на полярной орбите на высоте 500 км.

GRACE прекратил работу в 2017 году.

В 2018 году были запущены 2 новых спутника, GRACE-FO, которые позволяют производить измерения с более высокой точностью.

# Гравитационное поле Земли GGM03s

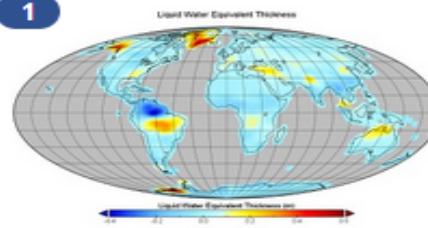
---



# Данные в архиве

Prev 1 Next

1



## JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Land Water-Equivalent-Thickness Surface-Mass Anomaly Release 6.0 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats

(TELLUS\_GRFO\_L3\_JPL\_RL06\_LND)

**Ocean Pressure, GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD**

**Platform/Sensor:** GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA

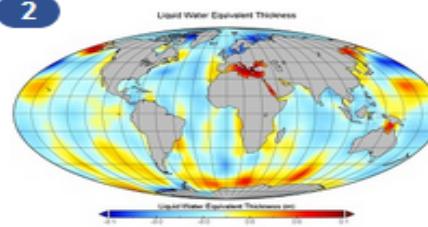
**Processing Level:** 3

**Longitude/Latitude Resolution:** 1 degrees x 1 degrees

**Start/End Date:** 2018-May-22 to Present

**Description:** The JPL monthly land mass grids contain land water mass anomaly given as equivalent water thickness derived from GRACE time-variable gravity observations during the specified timespan ... [more](#)

2



## CSR TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Ocean Bottom Pressure Anomaly Release 6.0 version 02 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats

(TELLUS\_GRFO\_L3\_CSR\_RL06\_OCN\_v02)

**GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD, OCEAN PRESSURE**

**Platform/Sensor:** GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA

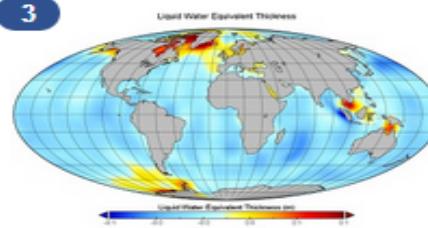
**Processing Level:** 3

**Longitude/Latitude Resolution:** 1 degrees x 1 degrees

**Start/End Date:** 2018-May-22 to Present

**Description:** The CSR monthly ocean bottom pressure grids are given as equivalent water thickness changes derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan in ... [more](#)

3



## JPL TELLUS GRACE-FO Level-3 Monthly Ocean Bottom Pressure Anomaly Release 6.0 version 02 in netCDF/ASCII/GeoTIFF Formats

(TELLUS\_GRFO\_L3\_JPL\_RL06\_OCN\_v02)

**GRAVITY/GRAVITATIONAL FIELD, OCEAN PRESSURE**

**Platform/Sensor:** GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA

**Processing Level:** 3

**Longitude/Latitude Resolution:** 1 degrees x 1 degrees

**Start/End Date:** 2018-May-22 to Present

**Description:** The JPL monthly ocean bottom pressure grids are given as equivalent water thickness changes derived from GRACE-FO time-variable gravity observations during the specified timespan in ... [more](#)

## Обработка данных GRACE

Мы используем данные L2 релиза 6.3, обработанные JPL в виде ежемесячных файлов с коэффициентами Стокса разложения гравитационного поля Земли C и S до 60-й степени порядка

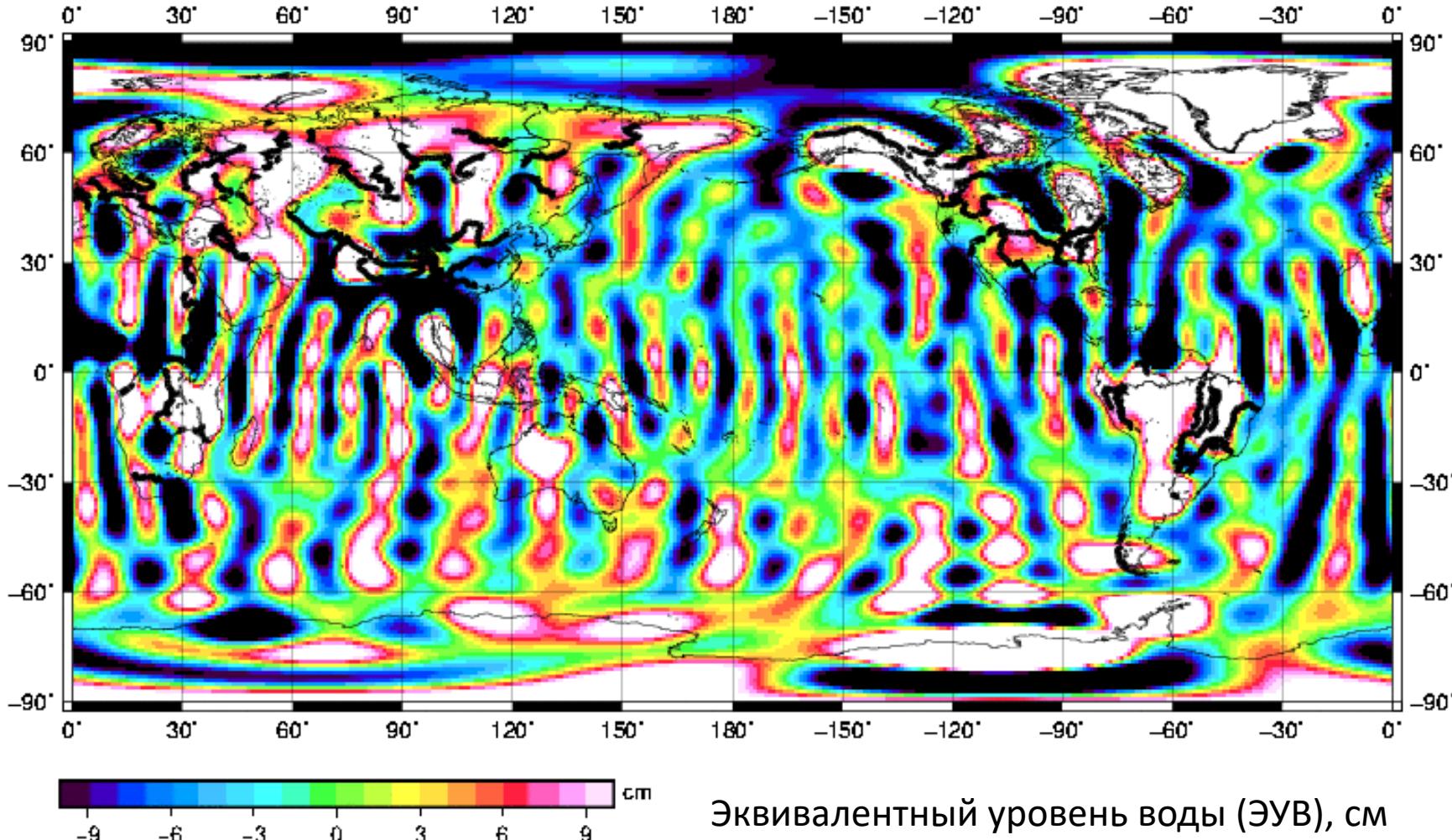
$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi),$$

Аномалии гравитационного поля переводятся в значения эквивалентного уровня воды (ЭУВ)  
плоского слоя

$$\Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} W_n(\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$$

# Исходные данные GRACE JPL RL06 Уровня 2

init 04/2002



# Многоканальный сингулярный спектральный анализ

---

1) Параметр задержки (лага)  $L$

МССА - обобщение МГК

Многоканальный сигнал

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$$

вкладывается в траекторную матрицу  $X$

2) SVD — сингулярное разложение матрицы

1D-CCA – “Гусеница”

$$X = USV^T$$

3) Для каждого сингулярного числа  $s_i$  восстанавливается матрица

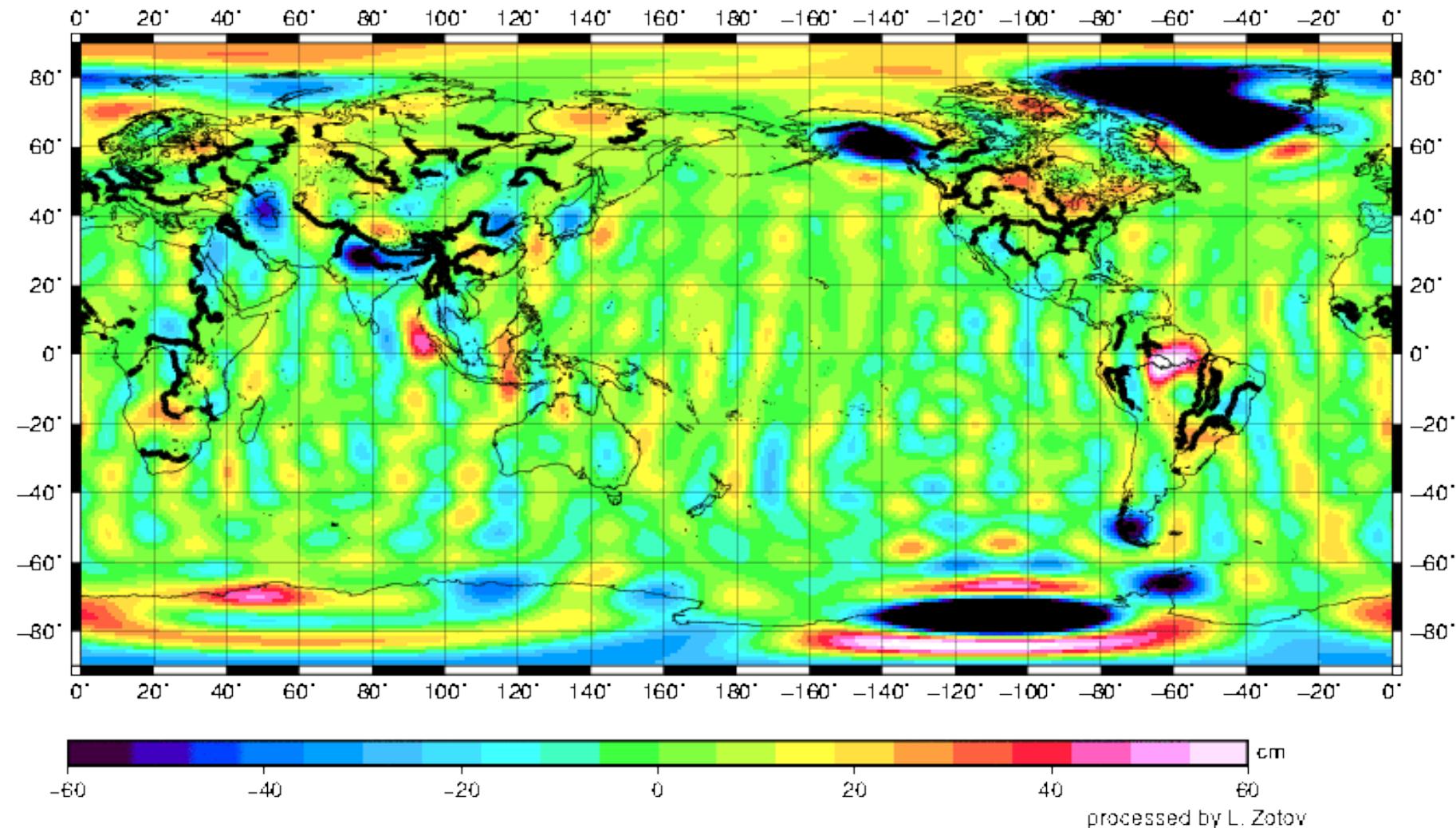
$$X^i = s_i u_i v_i^T,$$

И усреднением вдоль побочных диагоналей (Генкелизацией) восстанавливается компонента сигнала

4) Сходные сигналы группируются в Главные Компоненты (Principal Components)  
PC1, PC2, PC3...

# Тренды перераспределения масс в данных миссии GRACE

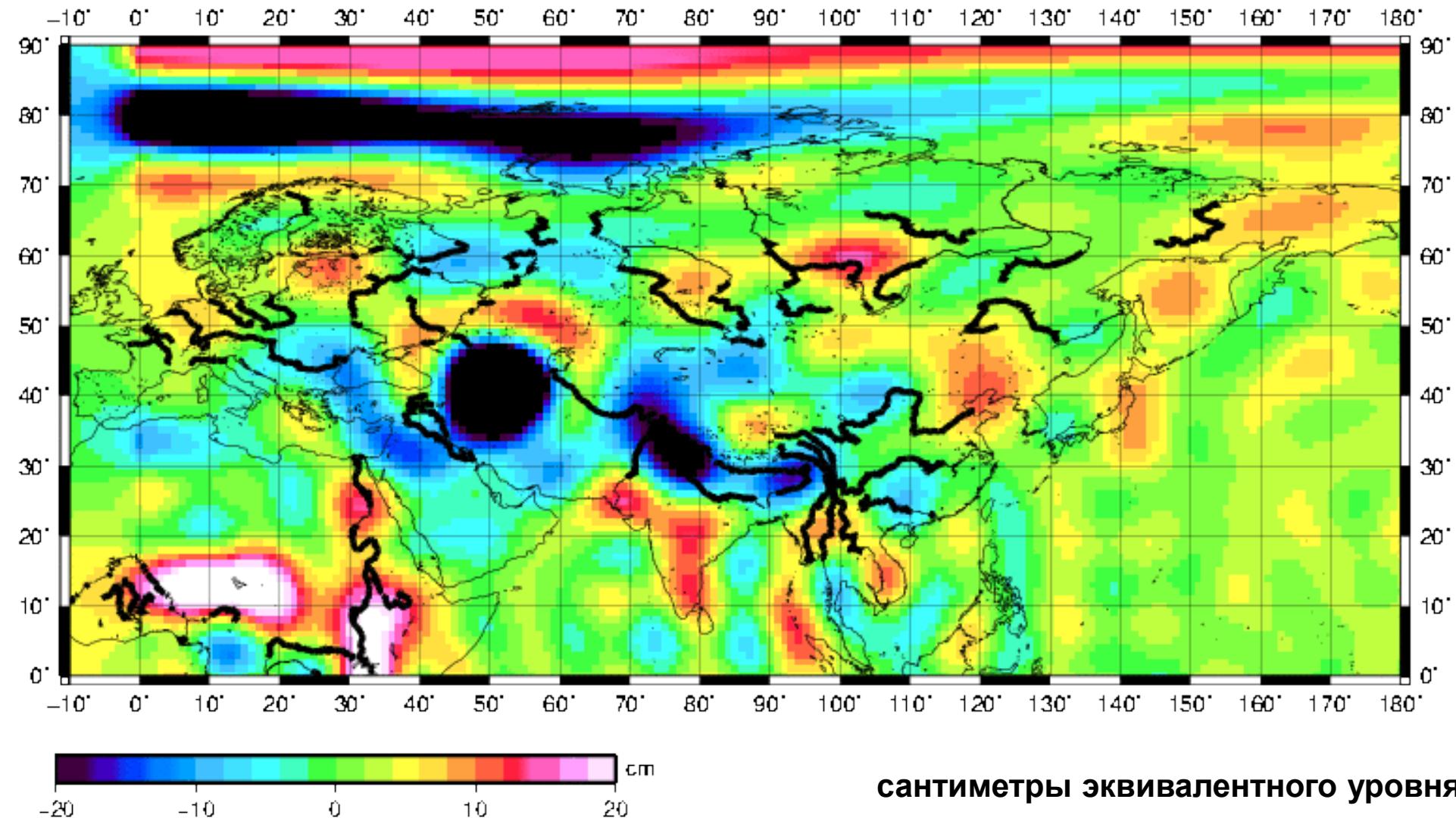
2017-2003 RL 06



Изменения масс вследствие климатических и других факторов

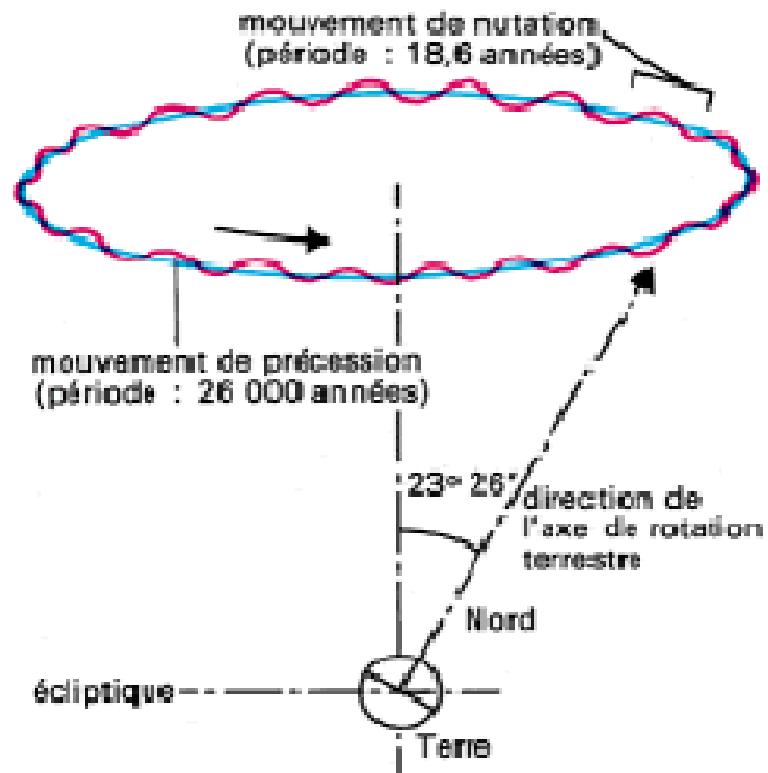
# Тренды перераспределения масс Евразии по GRACE-FO

2025-2018

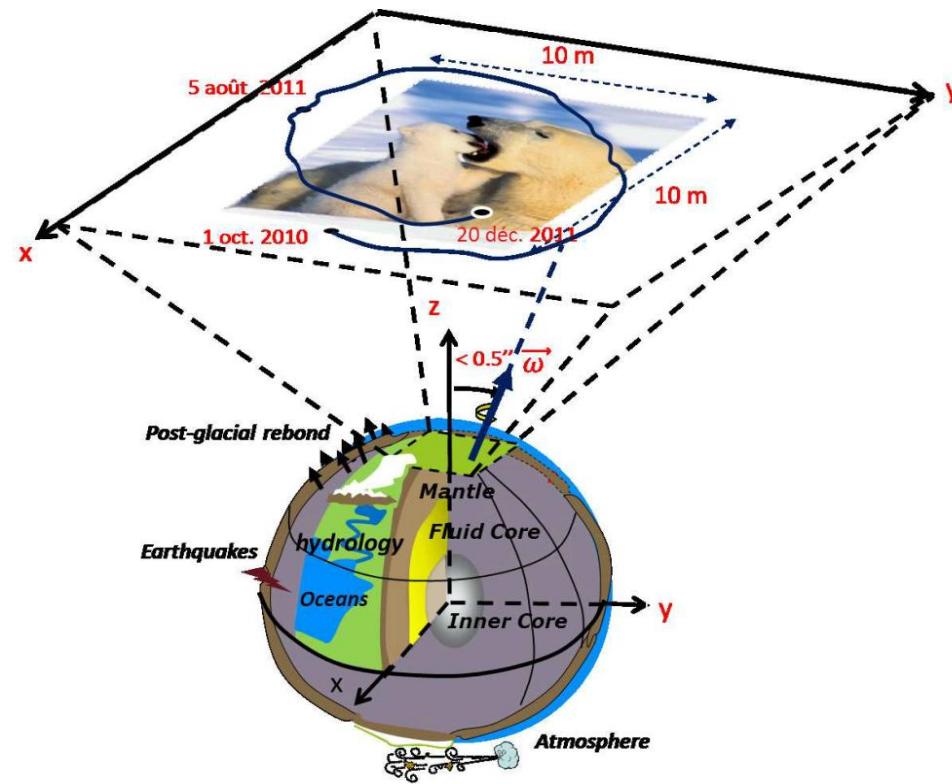


# Нутация и движение полюса

Прецессия (вековая) и нутация (периодическая)  
земной оси с периодами  
25 700, 18.6, 1, 0.5 лет, обусловленные  
внешним моментом сил от Луны и Солнца



Движение полюса амплитудой до 10 метров  
обусловленное геофизическими процессами –  
обменом угловым моментом между океаном,  
атмосферой и твердой землей



# Некоторые элементы теории движения полюса

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}) = \boldsymbol{\Lambda},$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}.$$

Уравнение для углового момента  
в неподвижной в подвижной

$$\left(\frac{d\mathbf{H}}{dt}\right)_S = \mathbf{L}, \quad \frac{d\mathbf{H}}{dt} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H} = \boldsymbol{\Gamma},$$

системах координат

Тензор инерции

$$\mathbf{I} + \delta\mathbf{I} = \begin{bmatrix} A + c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & B + c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & C + c_{33} \end{bmatrix}.$$

Вектор угловой скорости

$$\boldsymbol{\omega}_0 + \delta\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\Omega} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ 1 + m_3 \end{bmatrix}.$$

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

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

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

Комплексное линеаризованное  
уравнение Эйлера-Лиувилля

$$\frac{i}{\sigma_e} \dot{m} + m = \Psi, \quad \dot{m}_3 = \dot{\Psi}_3,$$

$$\Psi = \Psi_1 + i\Psi_2$$

$$m = m_1 + im_2, \quad c = c_{13} + ic_{23},$$

$$h = \dot{c}_{13} + i\dot{c}_{23}$$

Возбуждающие функции

$$\Psi_1 = \frac{1}{\Omega^2(C-A)} \left( \Omega^2 c_{13} + \Omega \dot{c}_{23} + h_2 + \Omega h_1 - \Lambda_2 \right),$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{\Omega^2(C-A)} \left( \Omega^2 c_{23} - \Omega \dot{c}_{13} - h_1 + \Omega h_2 + \Lambda_1 \right).$$

$$\Psi_3 = \frac{1}{\Omega^2 C} \left( -\Omega^2 c_{33} - \Omega \dot{h}_3 + \Omega \int_0^t \Lambda_3 dt \right).$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\sigma_e \omega_2, \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \sigma_e \omega_1, \quad \sigma_e = \Omega \frac{C - \frac{A+B}{2}}{\frac{A+B}{2}}.$$

частота Эйлера

комплексная Чандлеровская частота

$$\sigma_c = \sigma_e \frac{(1 - \frac{k_2}{k_s})}{(1 + e^{\frac{k_2}{k_s}})} = 2\pi f_c \left( 1 + \frac{i}{2Q} \right).$$

период T=433 сут fc=365.25/433 колебаний в год

запись через комплексную  
функцию углового момента

$$\chi = \frac{c}{(C-A)} + \frac{h}{\Omega(C-A)},$$

$$m = p - \frac{i}{\Omega} \dot{p}, \quad \frac{i}{\sigma_e} \dot{p} + p = \chi^{mass} + \chi^{motion} = \chi.$$

$$\chi_e^{mass} = \frac{1 + k'_2}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{mass}, \quad \chi_e^{motion} = \frac{1}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{motion}.$$

Геодезическое  
возбуждение

Геофизическое  
возбуждение

$$\frac{i}{\sigma_c} \frac{dp(t)}{dt} + p(t) = \chi^{tot}(t),$$

# Параметры ориентации Земли

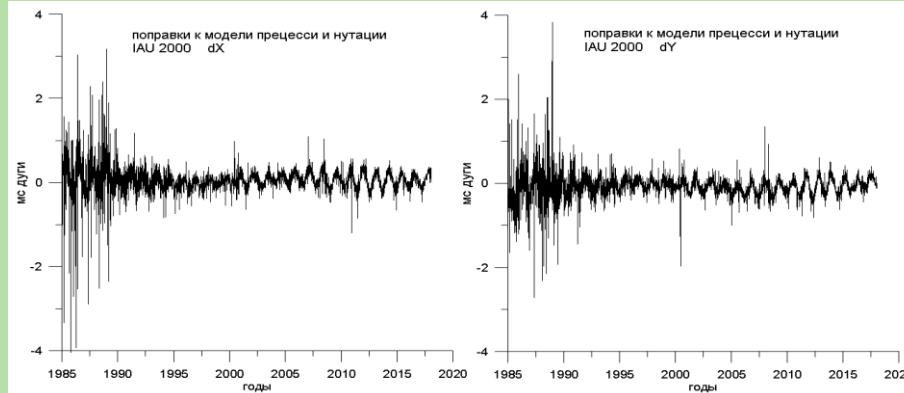
## $x, y$ координаты полюса

### UT1-UTC

### $dX, dY$

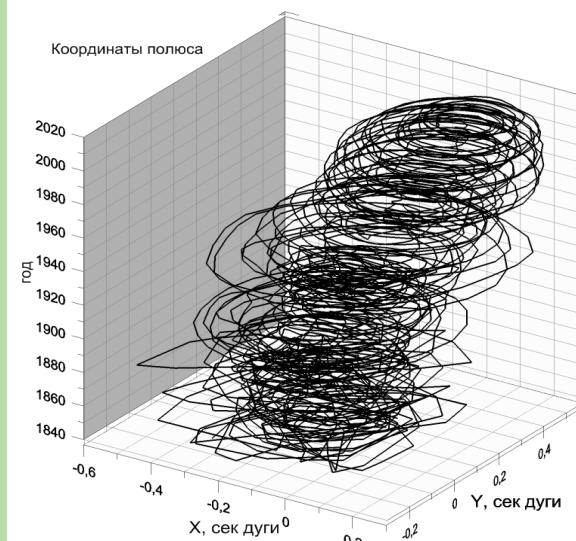
$$\theta(t) - \theta(t_0) = \Omega UT1 - \Omega t_0.$$

$$\Delta LOD = \frac{2\pi \cdot k}{\Omega(1 + m_3)} - \frac{2\pi \cdot k}{\Omega} \approx -\overline{LOD}m_3,$$

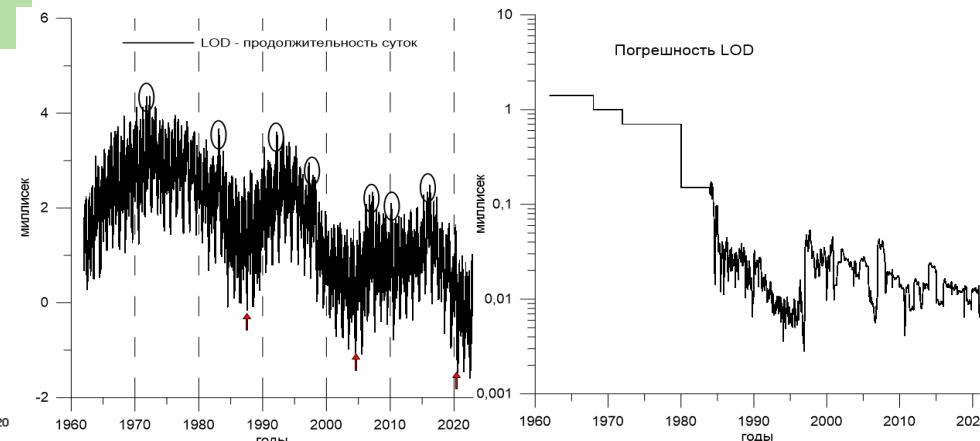
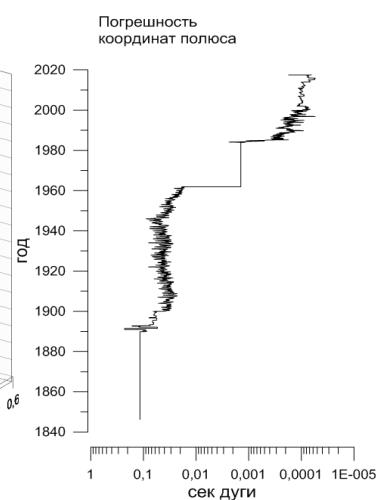


Поправки к углам прецессии и нутации

$x, y$  координаты полюса



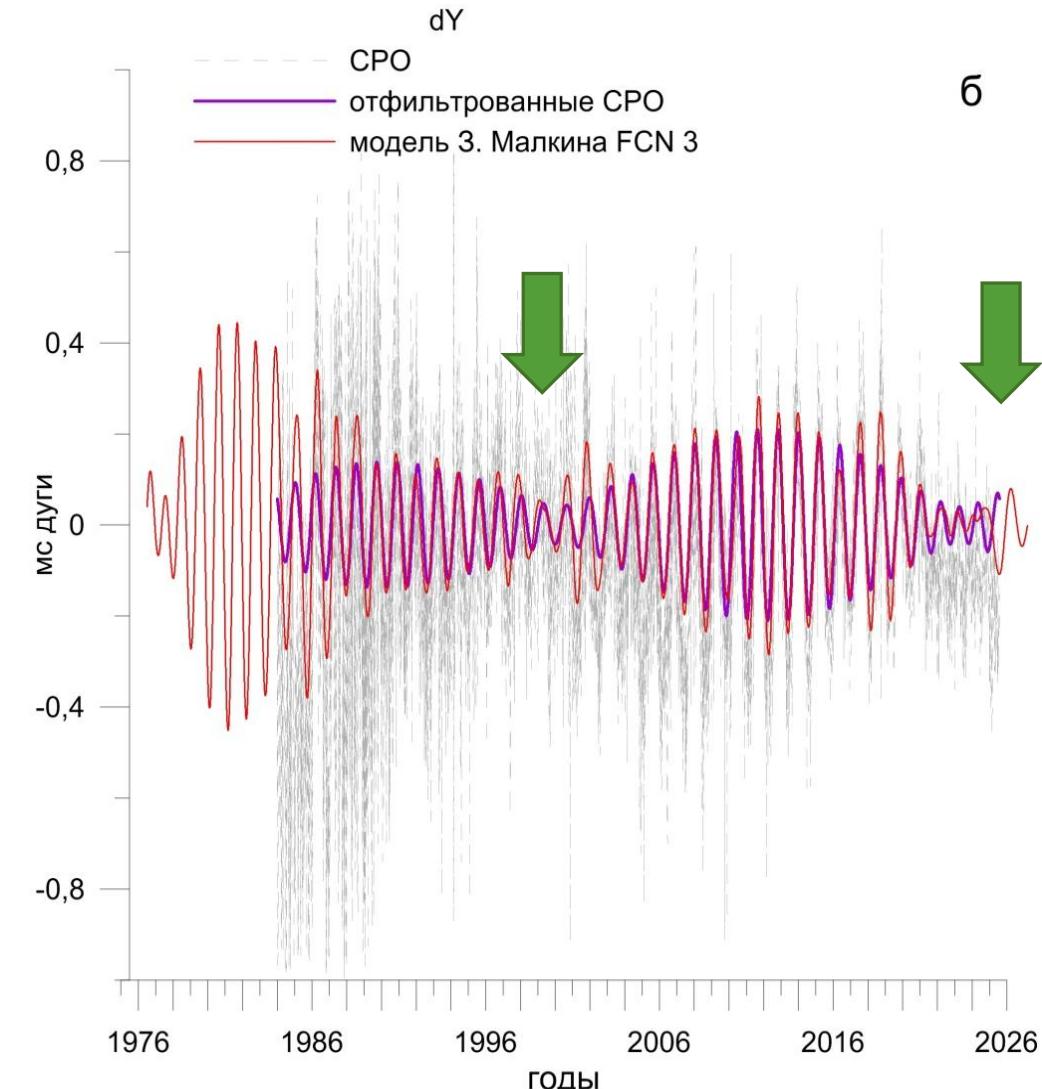
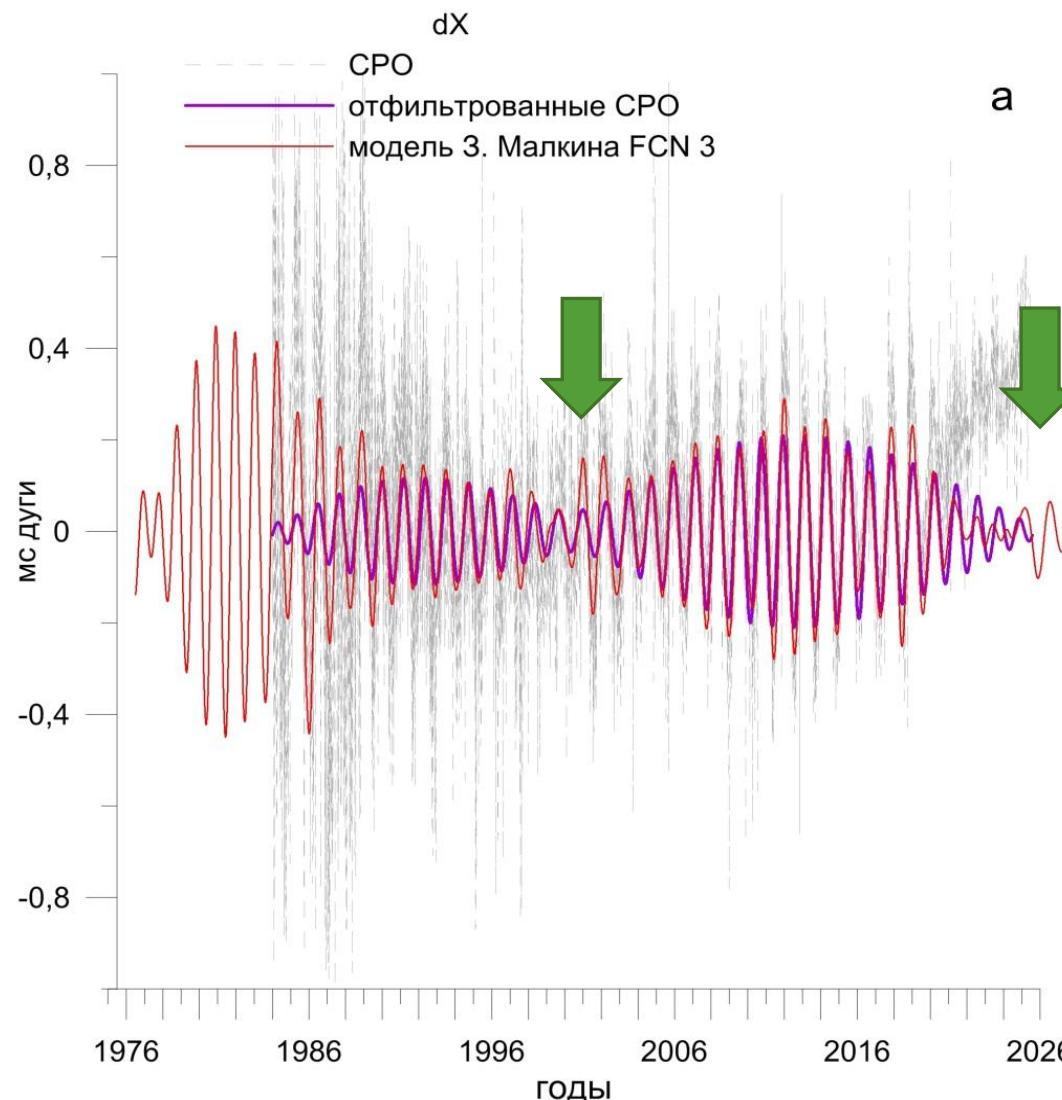
возрастание точности



длительность суток  
LOD

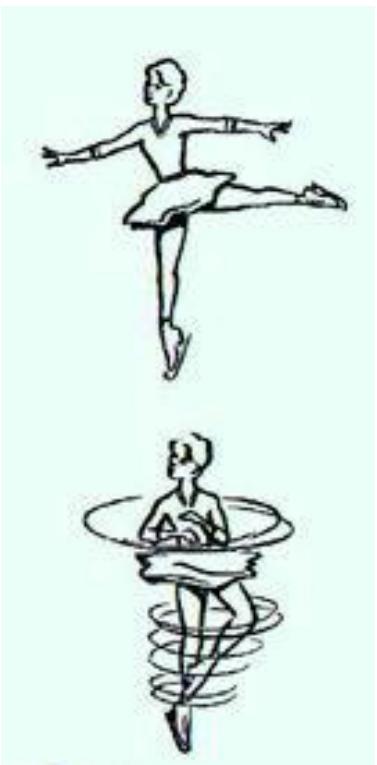
точность  
наблюдений

# Ослабление сигнала свободной нутации ядра FCN



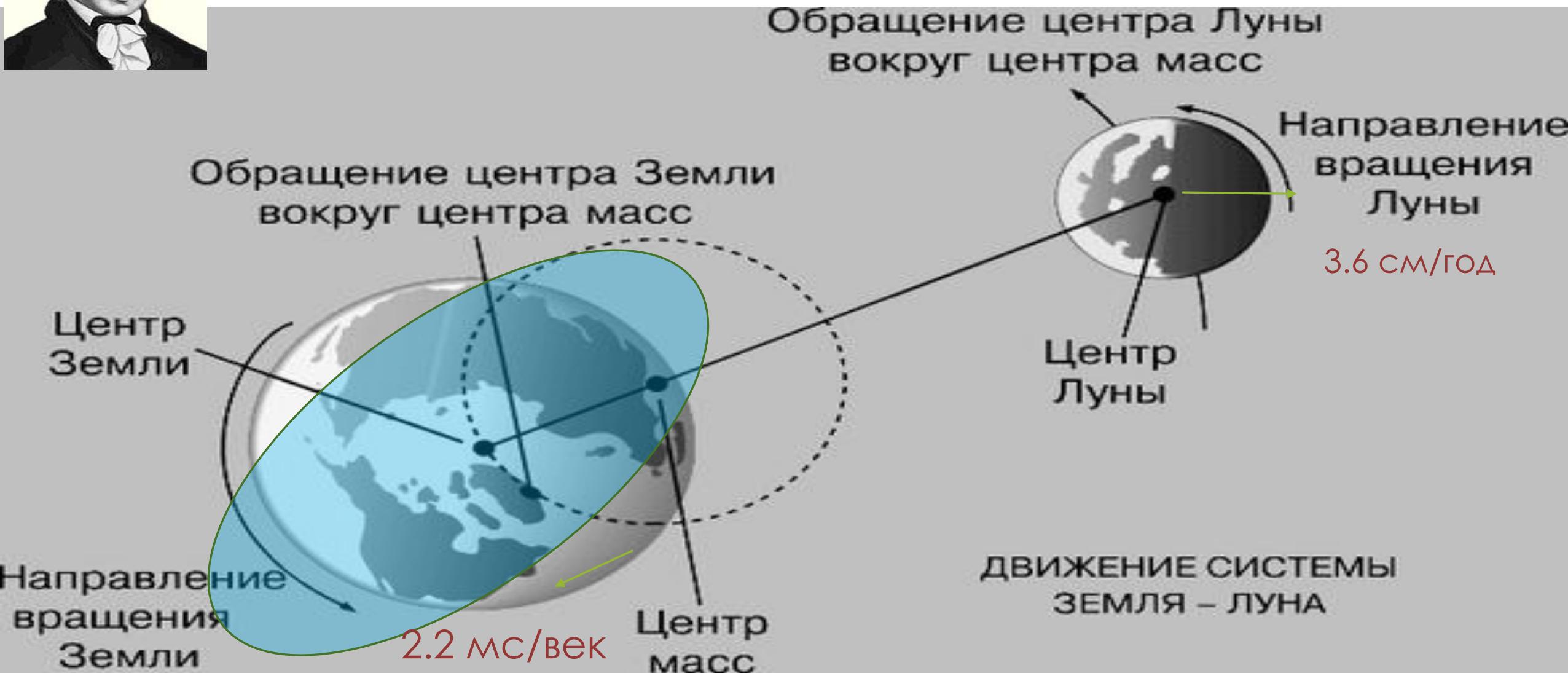
# Долговременные изменения длительности суток

## Length of Day LOD





Иммануил Кант предсказал  
торможение Земли в 1754 г

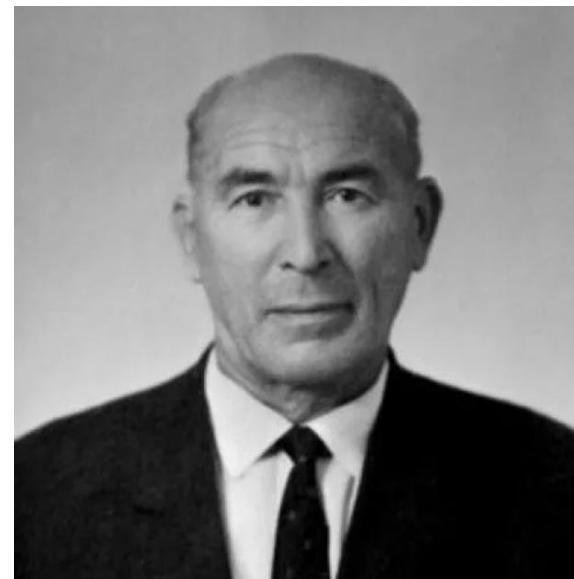


Часть 1

## ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИНЫ СУТОК И ДЕФОРМАЦИЯ ЗЕМЛИ<sup>1</sup>

Н. Н. Парицкий



<sup>1</sup> Астрон. журн. 1945. Т.22, вып. 2, С.106-121.

луну, ...  
 Вторые две причины связаны между собой, а не с движением Луны.  
 только их суммарный эффект. (Точнее, на замедление вращения Земли действуют и лунные и  
 солнечные приливы, а на замедление движения Луны – только лунные приливы.)

Если мы воспользуемся упрощенной теорией, которой пользовался Джейффреис, считая  
 орбиты Земли и Луны круговыми, лежащими в одной плоскости, плоскости экватора и эклип-  
 тики совпадающими, и примем во внимание необходимость сохранения четырех соотношений:  
 1) третьего закона Кеплера для движения Луны вокруг Земли, 2) того же закона для движения  
 системы Земля–Луна вокруг Солнца, 3) закона сохранения момента количества движения к  
 4) закона сохранения энергии  $E$ , то получим четыре уравнения:

$$n^2 a^3 = G(M + m),$$

$$n_0^2 a_0^3 = G(M + m + m_0),$$

$$I\omega + \mu n a^2 + \mu_0 n_0 a_0^2 = \text{const},$$

$$E = \frac{1}{2} I\omega^2 - \frac{1}{2} \mu n^2 a^2 - \frac{1}{2} \mu_0 n_0^2 a_0^2 + \text{const},$$

где  $m_0$  – масса Солнца,  $n_0$  – средняя угловая скорость движения и  $a_0$  – большая полуось орби-  
 ты центра тяжести системы Земля–Луна,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли, а

$$\mu = \frac{Mm}{M + m} \approx m; \quad \mu_0 = \frac{(M + m)m_0}{M + m + m_0} \approx M.$$

Считая пока, что момент инерции Земли  $I$  не меняется, мы для связанных между собой измене-  
 ний  $\omega$ ,  $n$  и  $n_0$  будем иметь уравнения (в приближенной теории)

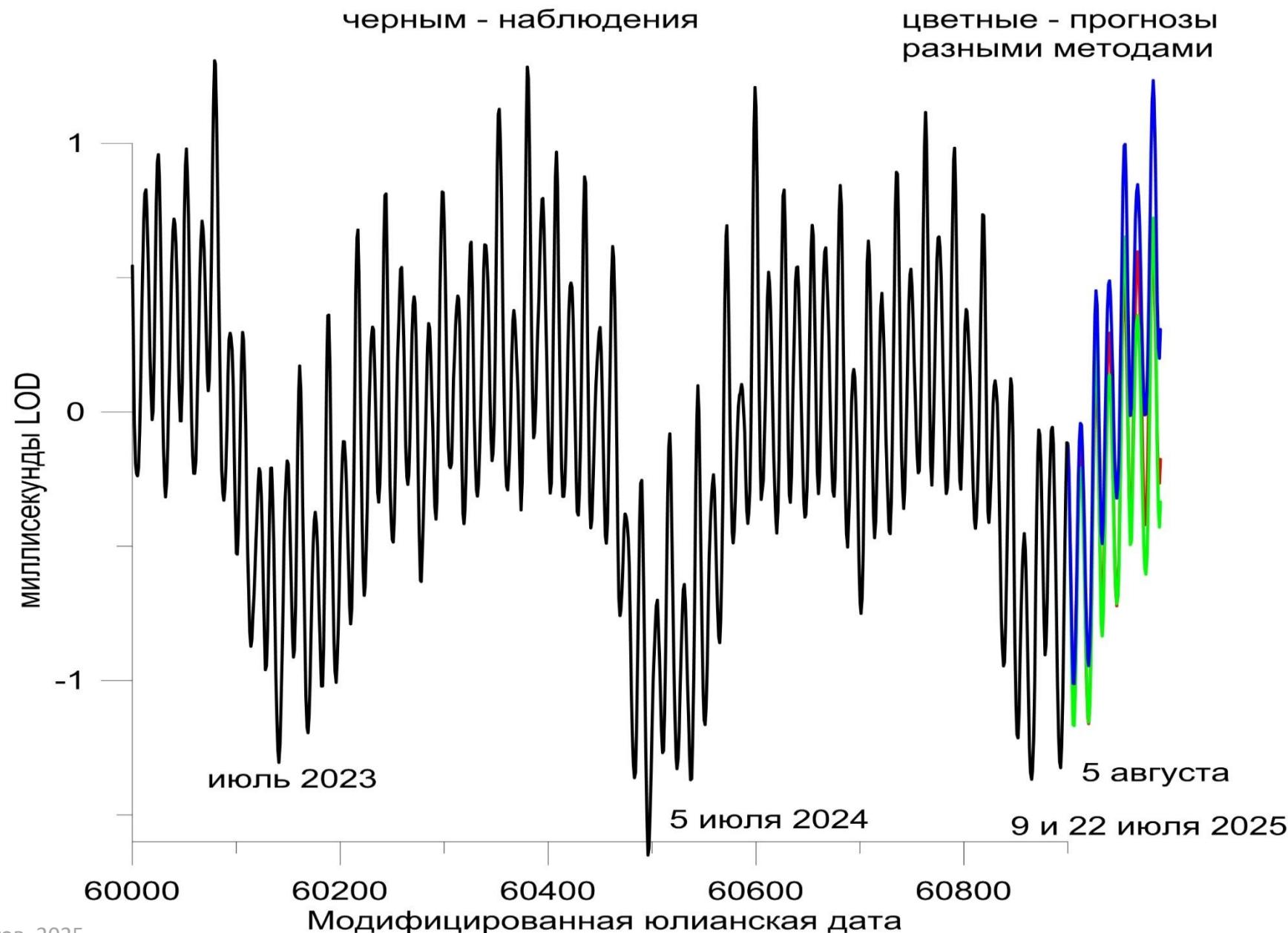
# Геофизические процессы, влияющие на вращение Земли

от 1 до 1 000 000 лет



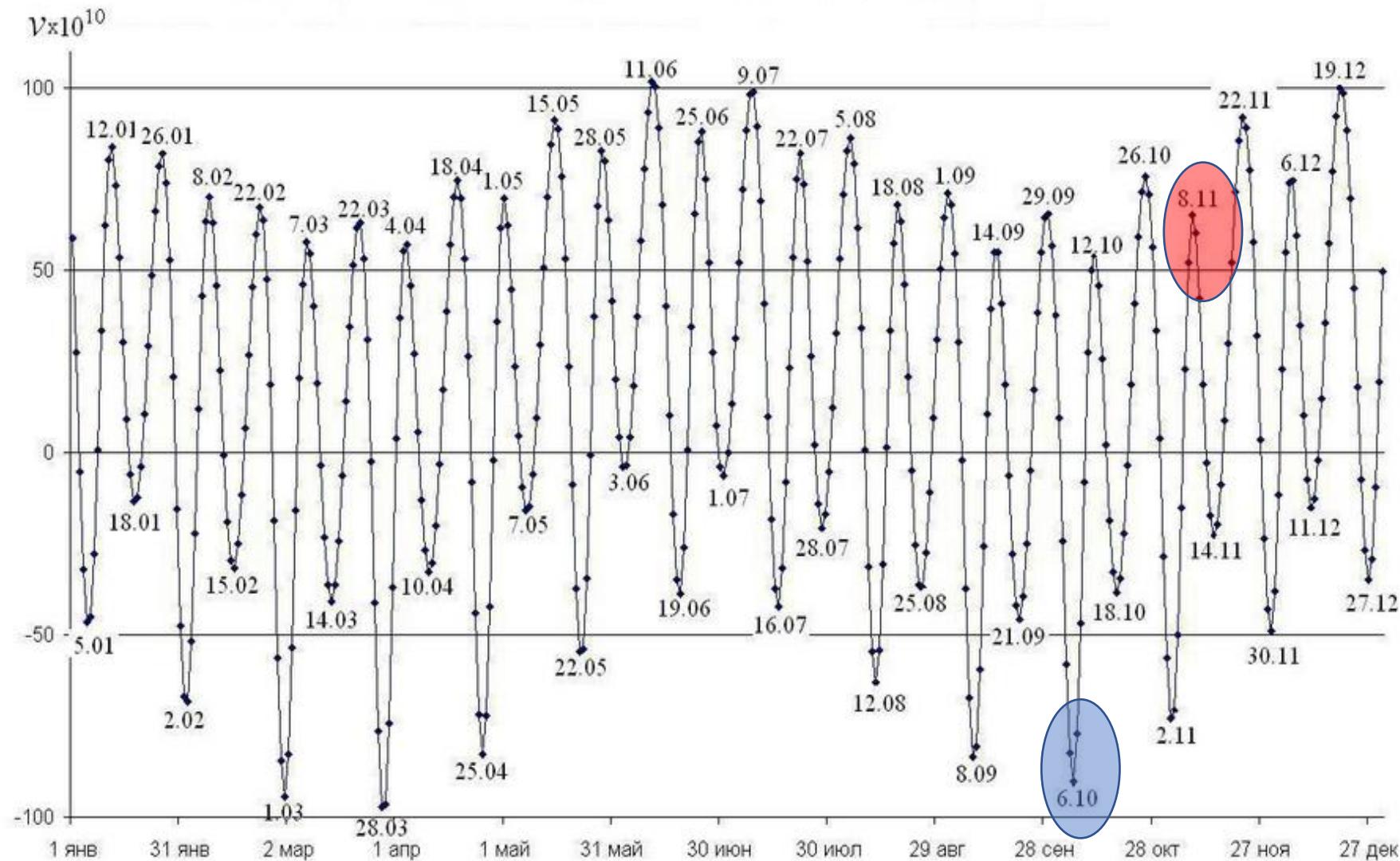
credit: C. Bizouard

# Вращение Земли летом 2025 года



# ГЕОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ПОГОДА

Приливные колебания угловой скорости вращения Земли в 2025 г.





News ▾ World Clock ▾ Time Zones ▾

Home / News / Astronomy News / Earth Will Spin Unusually

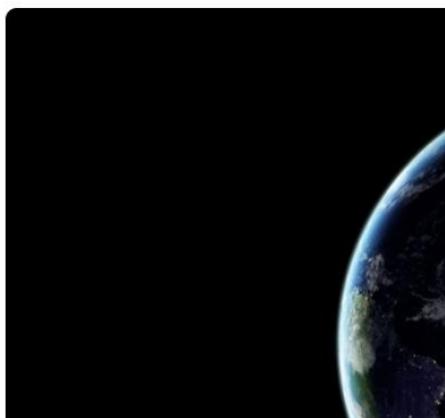
## Earth Will Spin Unusually in 2025

Since 2020, Earth has notched up unprecedently short days again in 2025 around July 9, July 22, and August 5.



By [Graham Jones](#)

Published 16-Jun-2025. Changed 11-Jul-2025



Latest estimates from mid-August confirm that **the shortest days of 2025** fell around July 9, July 22, and August 5—but were not quite as short as the shortest day of 2024. “It seems Earth has started to decelerate and the most extreme lengths of day have been left in 2024,” notes Leonid Zotov.

Year	Date	Length of Day (LOD)
2025	July 9	-1.34 ms (to be confirmed)
2025	July 10	-1.37 ms (to be confirmed)
2025	July 22	-0.88 ms (to be confirmed)
2025	August 5	-1.31 ms (to be confirmed)
2025	August 6	-1.32 ms (to be confirmed)

Sources: timeanddate.com, [IERS](#), [USNO](#). Estimates are based on observations and models, and include systematic corrections and smoothing. Date: August 13, 2025.

# Get Ready For What Began As Earth Day

By [Jamie Carter](#), Senior Contributor. (

Published Jun 20, 2025, 05:00am EDT, Updated

[Share](#) [Save](#) [Comment 1](#)

## TOPLINE

Earth could be about to record its shortest day ever. It's spinning faster than at any point since records began. Last year, the shortest day was just 1.59 seconds longer than a day close to this again on or close to July 1.



## Earth Is Spinning Faster and Getting Shorter, for Now

The planet's rotation fluctuates as it travels around the sun. Measurements suggest we're losing more than a millisecond a day during the long days of summer.

Listen to this article · 4:56 min [Learn more](#)

Share full article



Home > Culture > Culture News

JULY 14, 2025

## Earth Just Had One Of The Shortest Days Ever And More Are Coming

We're in a spin



Ruby Feneley

PRINT



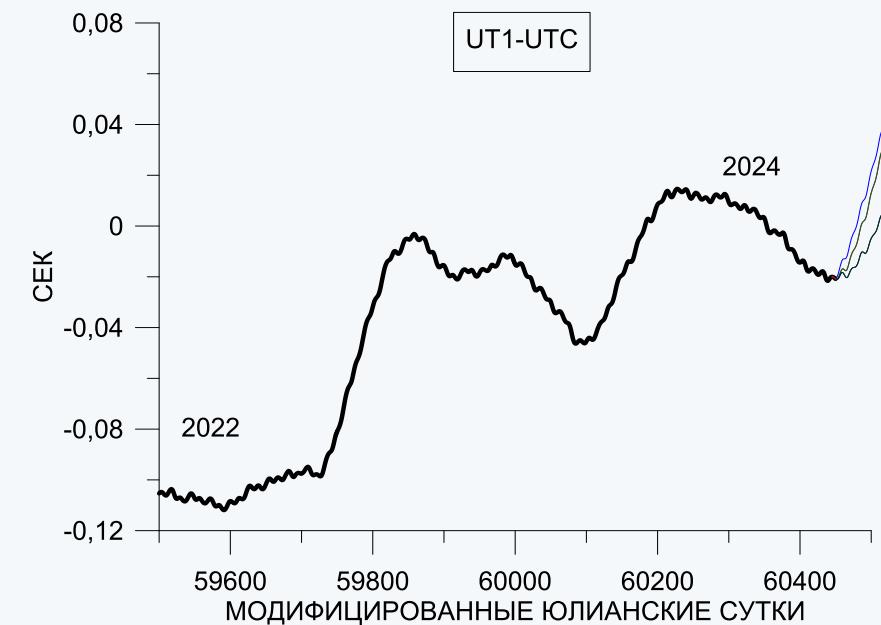
Image: Getty

# ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЕКУНДА - LEAP SECOND

ВВОДИТСЯ ЧТОБЫ РАССОГЛАСОВАНИЕ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЯЕМОГО ПО ВРАЩЕНИЮ ЗЕМЛИ UT И ШКАЛЫ ВСЕМИРНОГО АТОМНОГО ВРЕМЕНИ UTC НЕ ПРЕВЫСИЛО 0.9 СЕК

ОБЫЧНО ПРИБАВЛЯЛАСЬ В КОНЦЕ ГОДА К UTC,  
НО СЕГОДНЯ ВСТАЛ ВОПРОС О ЕЕ ВЫЧИТАНИИ

2006	Jan.	1	-	2009	Jan.	1	33с
2009	Jan.	1	-	2012	Jul.	1	34с
2012	Jul.	1	-	2015	Jul.	1	35с
2015	Jul.	1	-	2017	Jan.	1	36с
2017	Jan.	1	-				37с



# A global timekeeping problem postponed by global warming

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>

Received: 4 August 2023

Accepted: 6 February 2024

Published online: 27 March 2024

 Check for updates

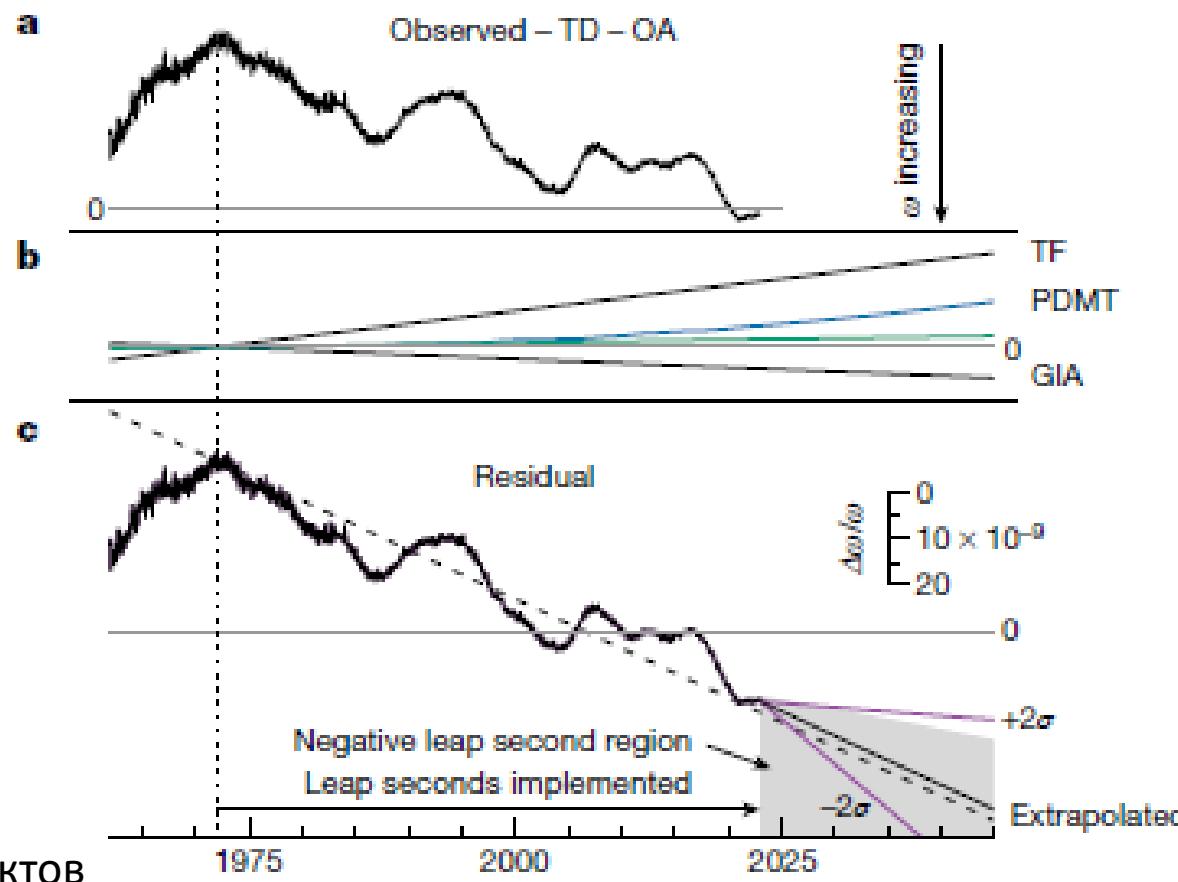
Верху – кривая LOD  
длительности суток

TF – приливное трение

GIA – последелниковое  
поднятие

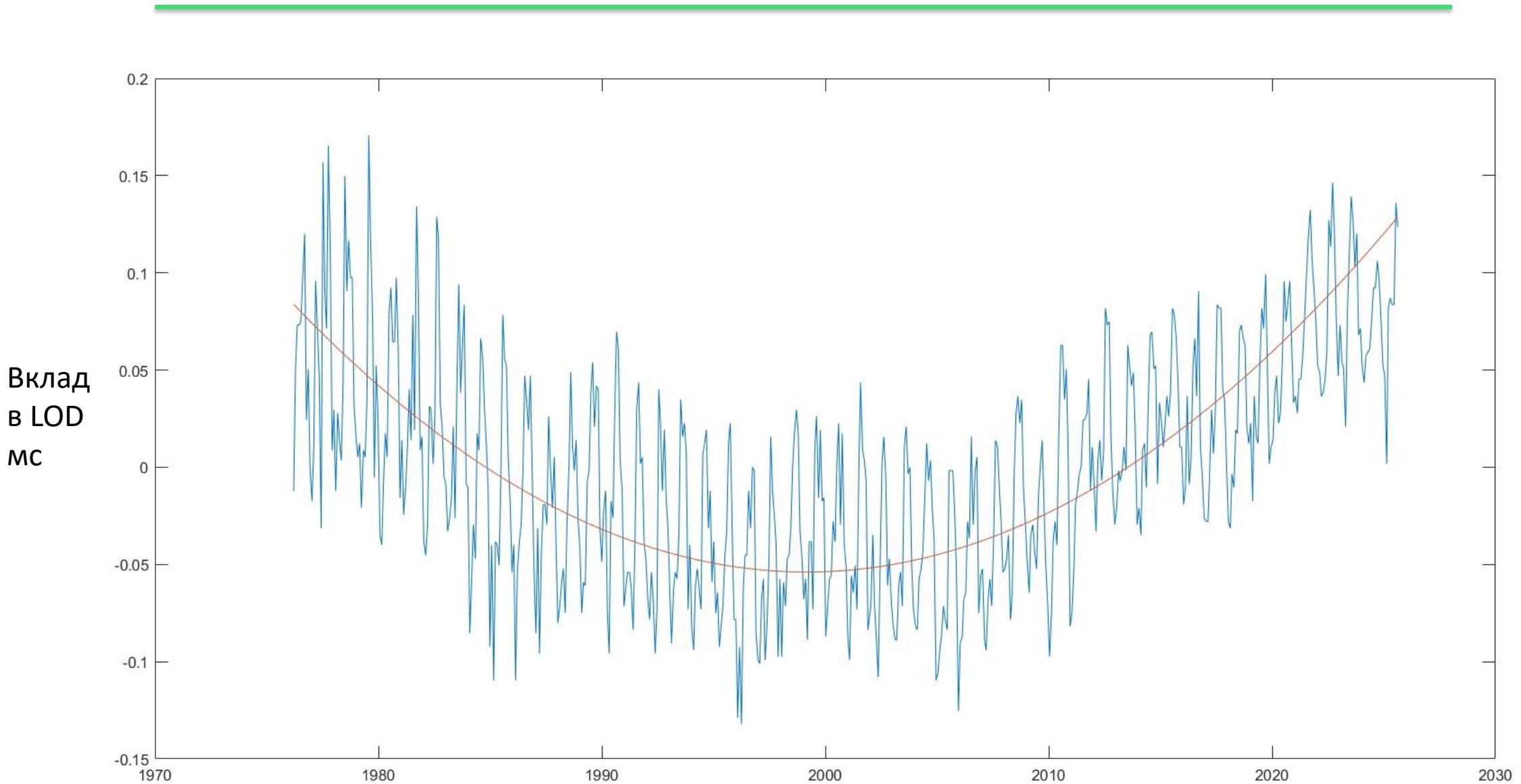
PDMT – перенос масс сегодня

внизу – как шла бы LOD за  
вычетом климатических эффектов

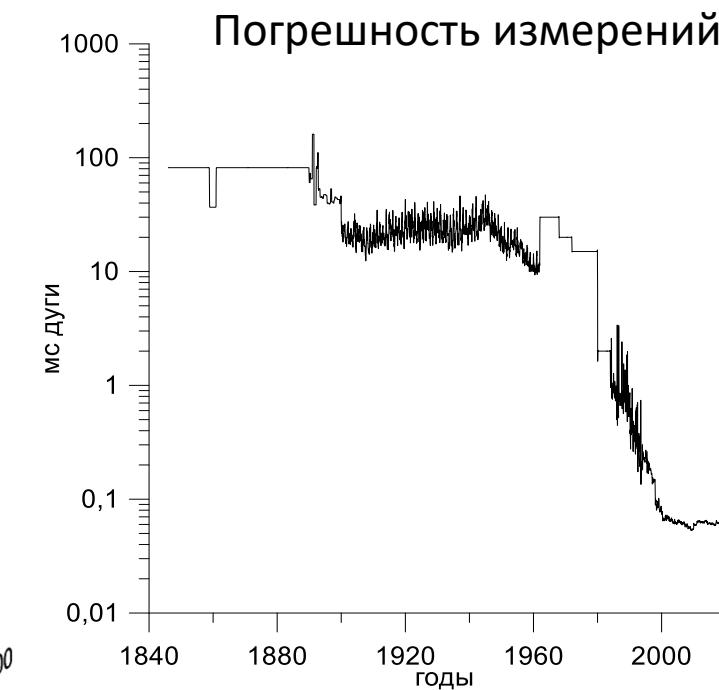
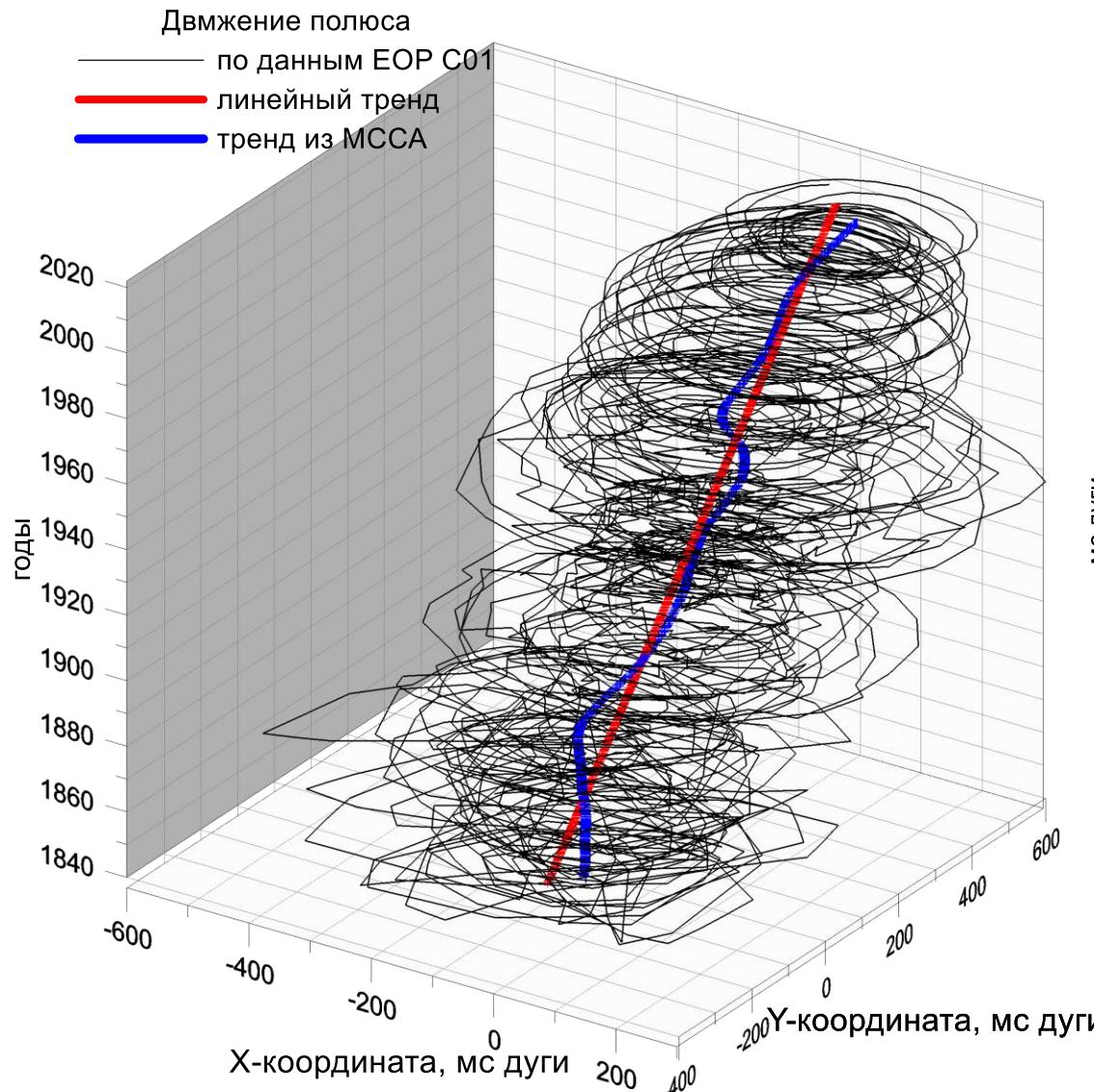


<sup>1</sup>Institute of Geophysics and Planetary Physics, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA, USA. <sup>✉</sup>e-mail: dagnew@ucsd.edu

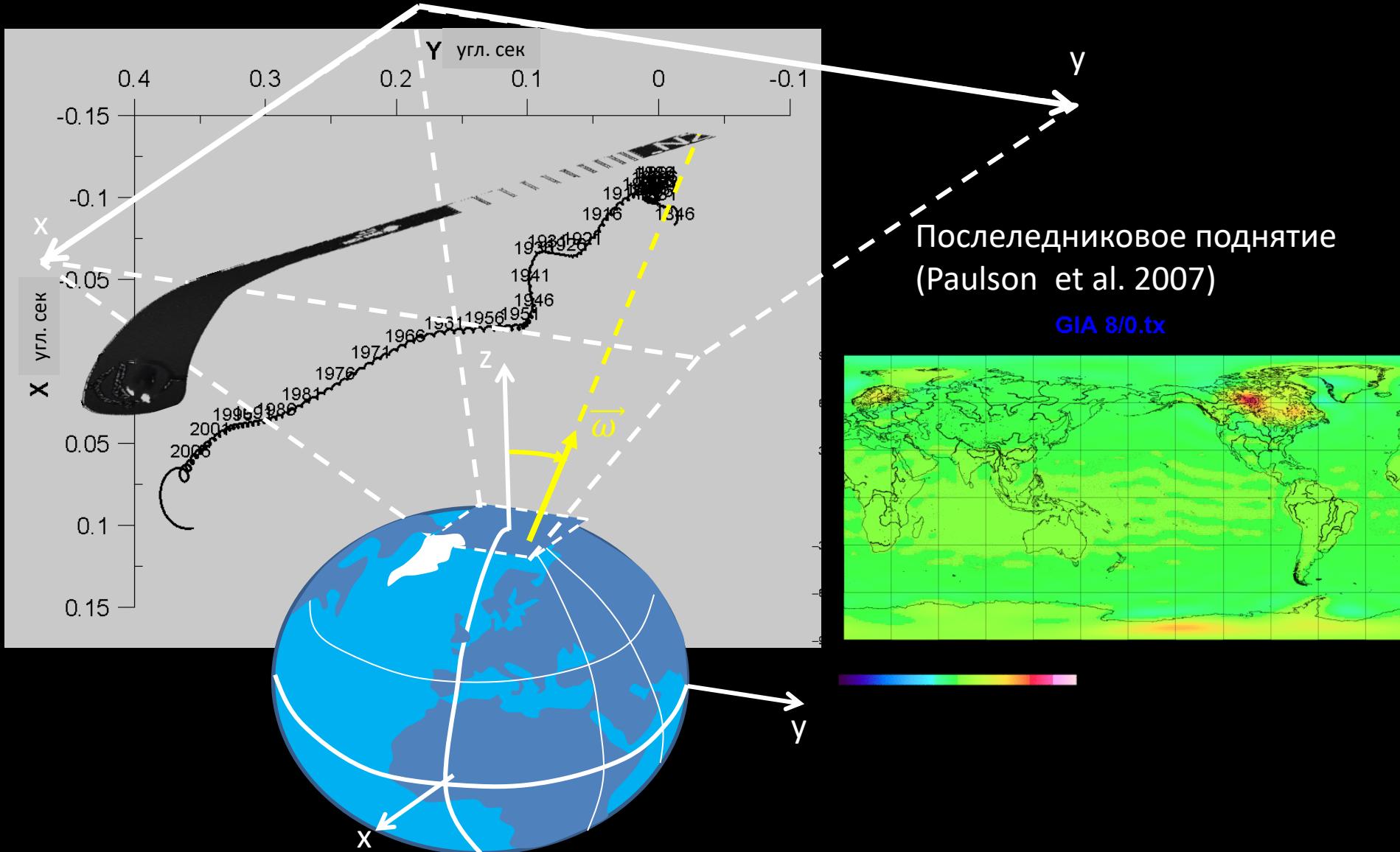
# Коэффициент $J_2 = -\sqrt{5}C_{20}$ по SLR и GRACE и его вклад в LOD



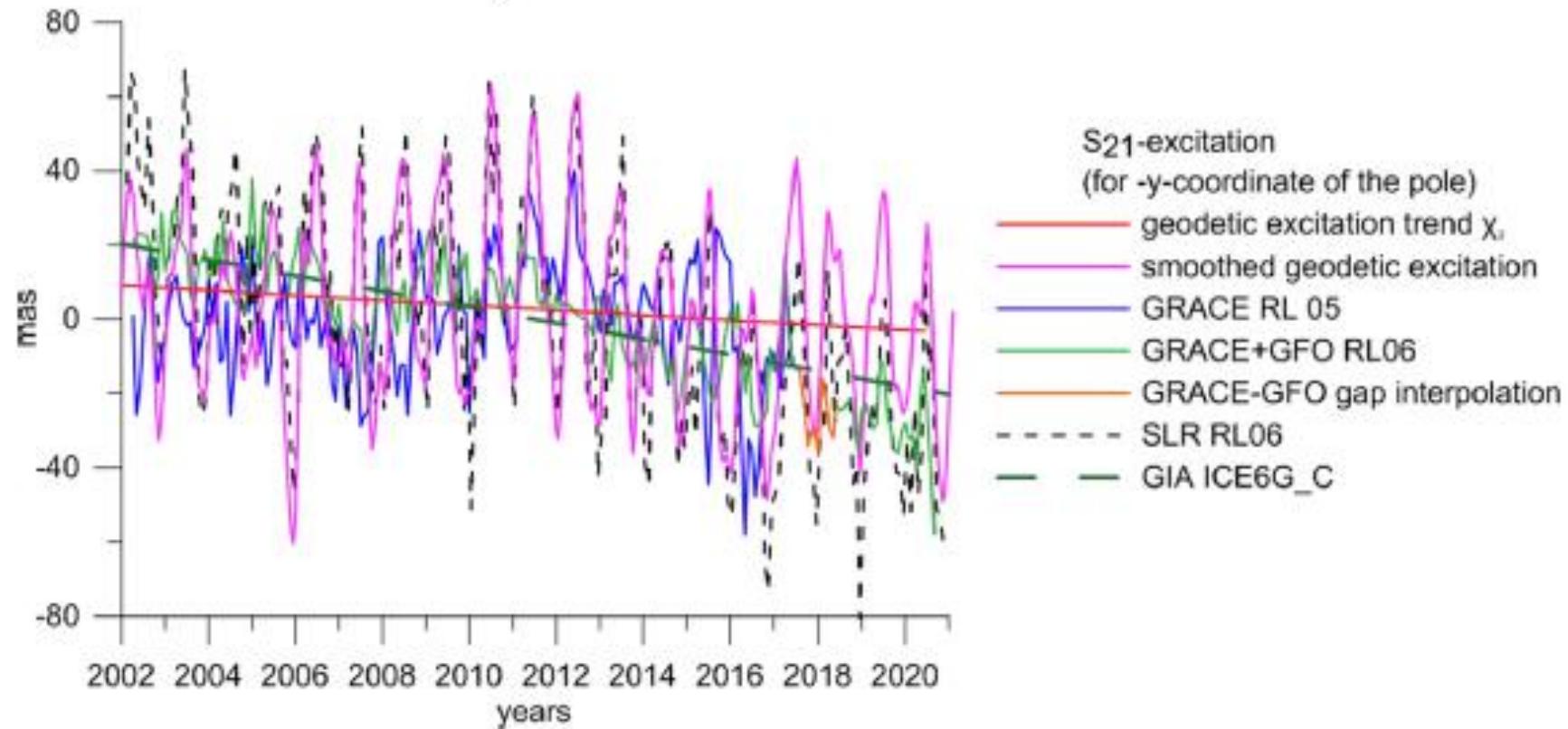
# Движение полюса с 1846 по 2025 из бюллетеня ЕОР С01



# Тренд движения полюса и послеледниковое поднятие



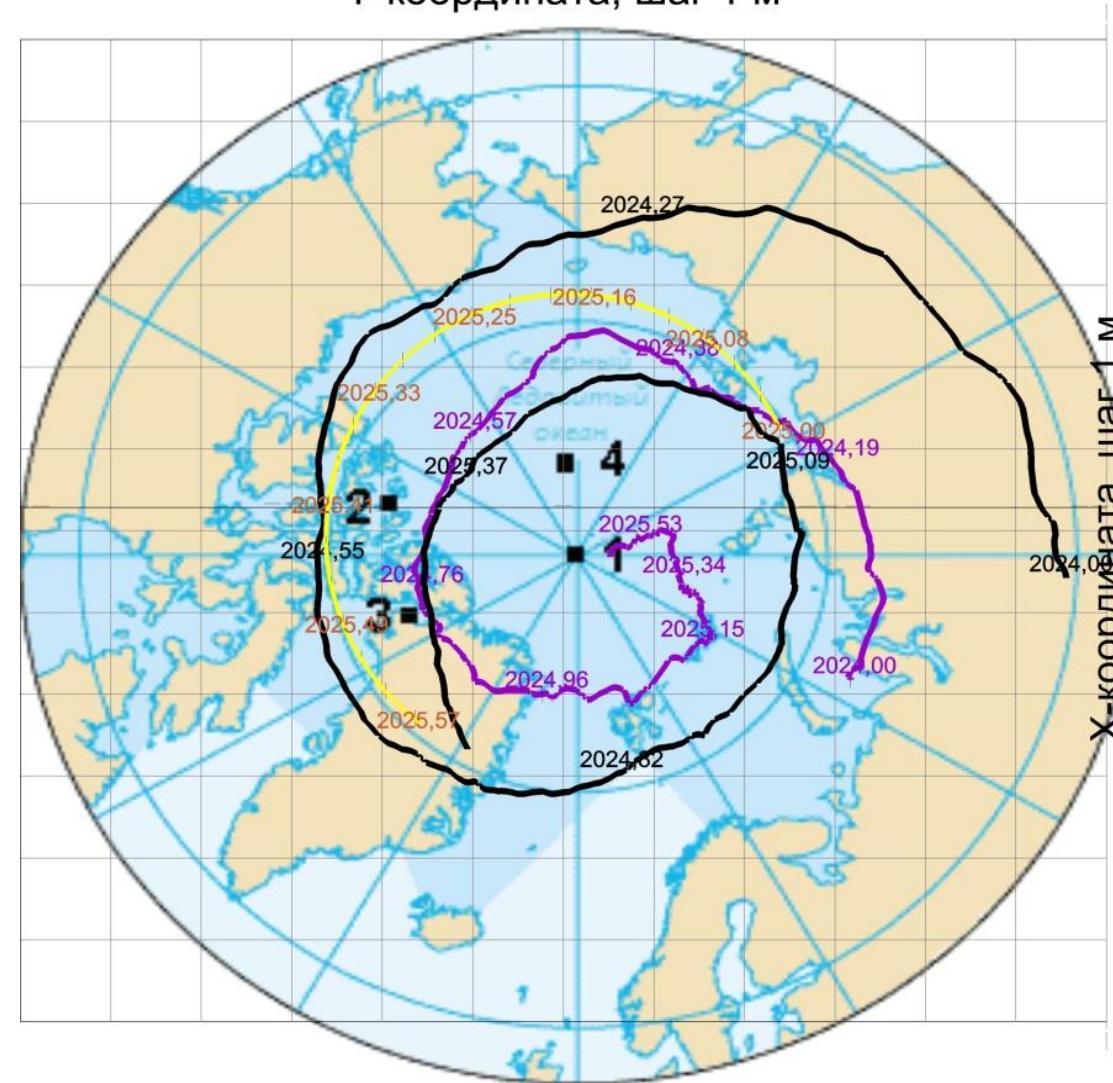
# Согласие коэффициентов $C_{21}$ $S_{21}$ по SLR и GRACE с трендами движения полюса



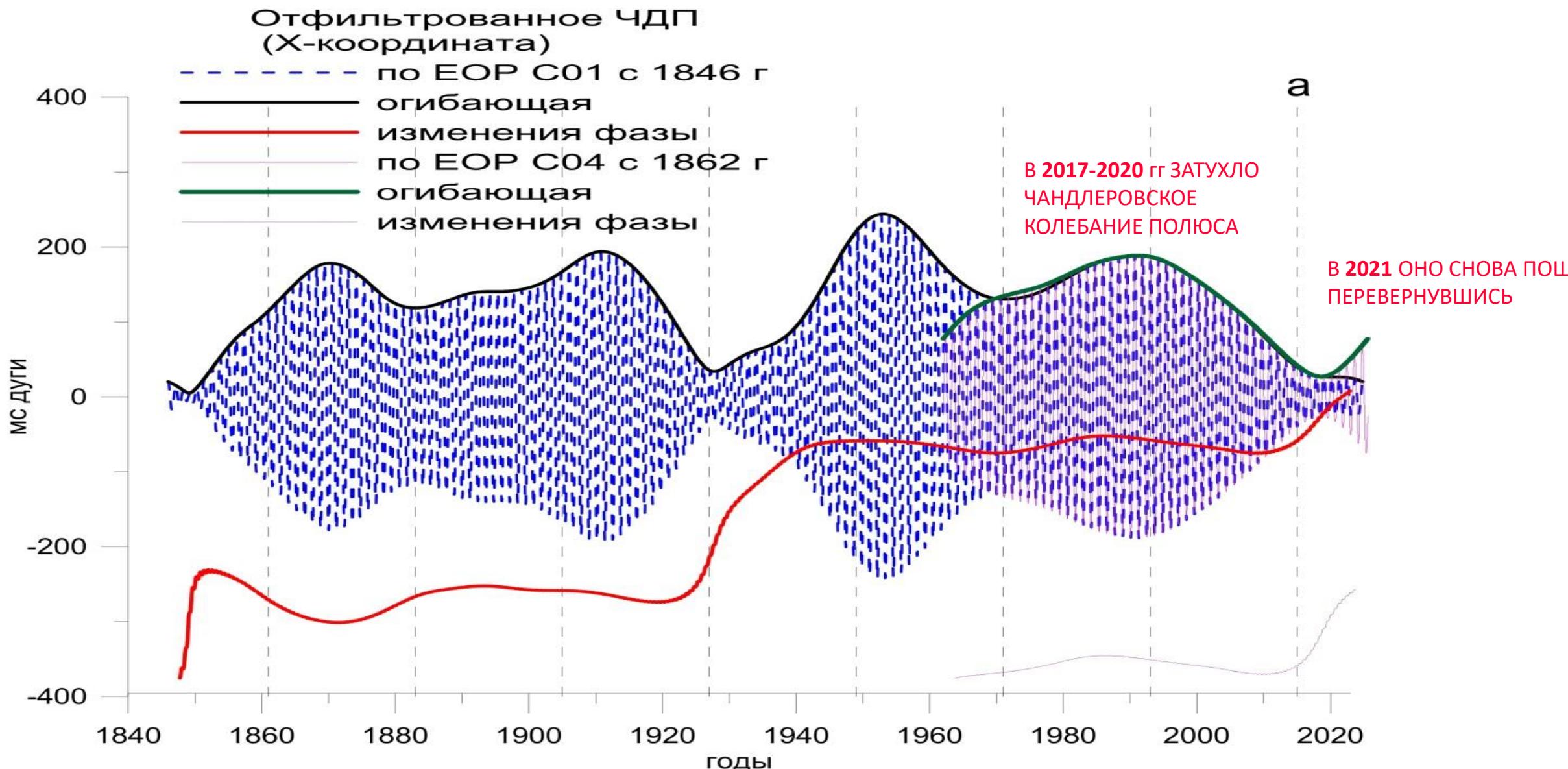
Климатологическое перераспределение масс ответственно за дрейф полюса.

Движение полюса  
по данным EOP C01  
Чандлеровское колебание  
ДП за вычетом годового колебания  
годовое колебание

Y-координата, шаг 1 м



# Чандлеровское колебание с 1846 по 2025 и его фаза



# Динамическая модель вращения Земли

$$\frac{i}{\sigma_c} \frac{dp(t)}{dt} + p(t) = \chi(t)$$

$$p = p_1 + ip_2$$

$$\chi = \chi_{mass} + \chi_{motion}$$

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

$$f_c = \frac{1}{433} \text{ cут}^{-1} \quad Q = 100$$

Во временной области

$$\frac{-\omega \hat{p}(\omega)}{\sigma_c} + \hat{p}(\omega) = \hat{\chi}(\omega)$$

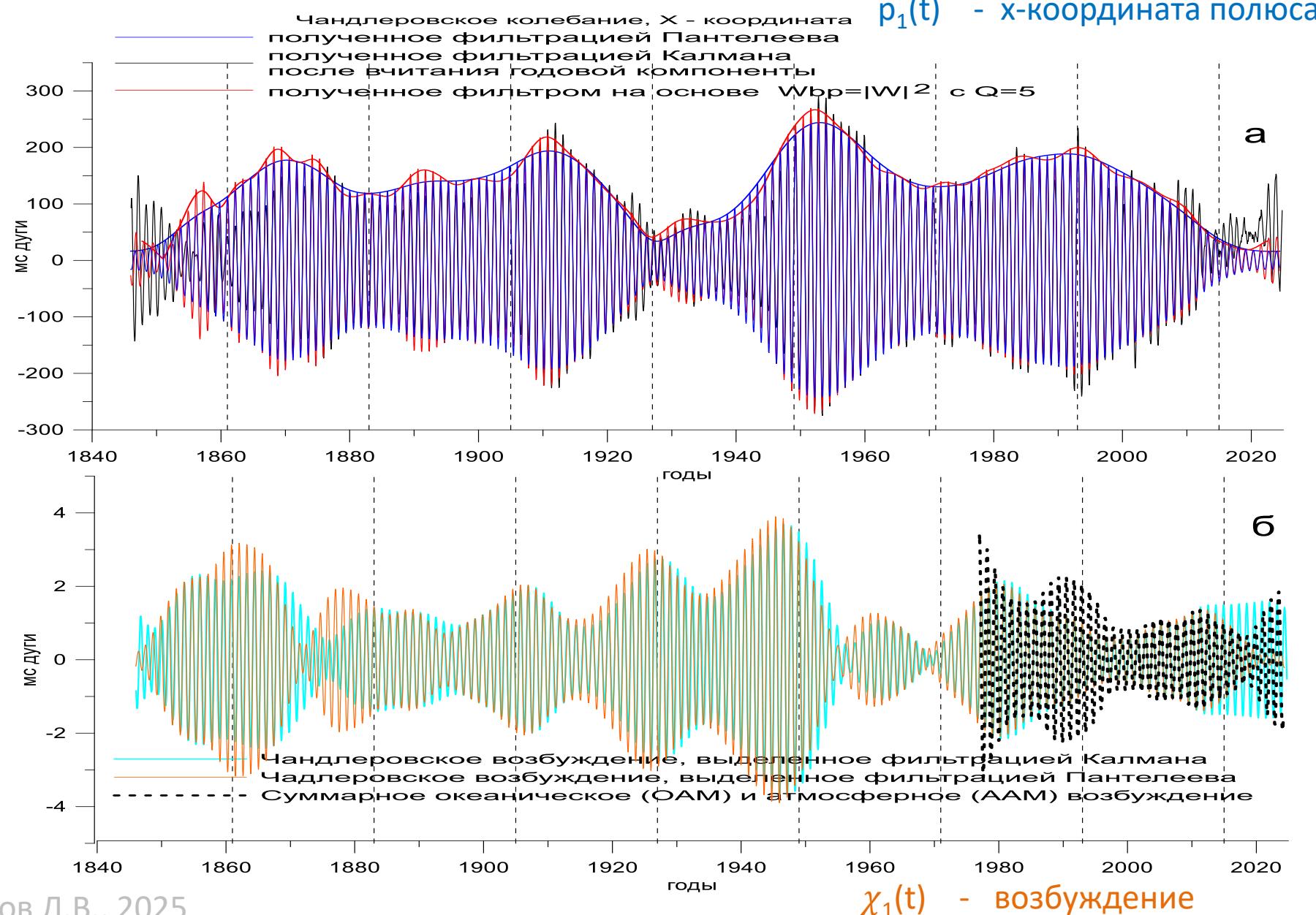
$$\frac{\sigma_c - \omega}{\sigma_c} \hat{p}(\omega) = \hat{\chi}(\omega)$$

$$\hat{p}(\omega) = W(\omega) \hat{\chi}(\omega)$$

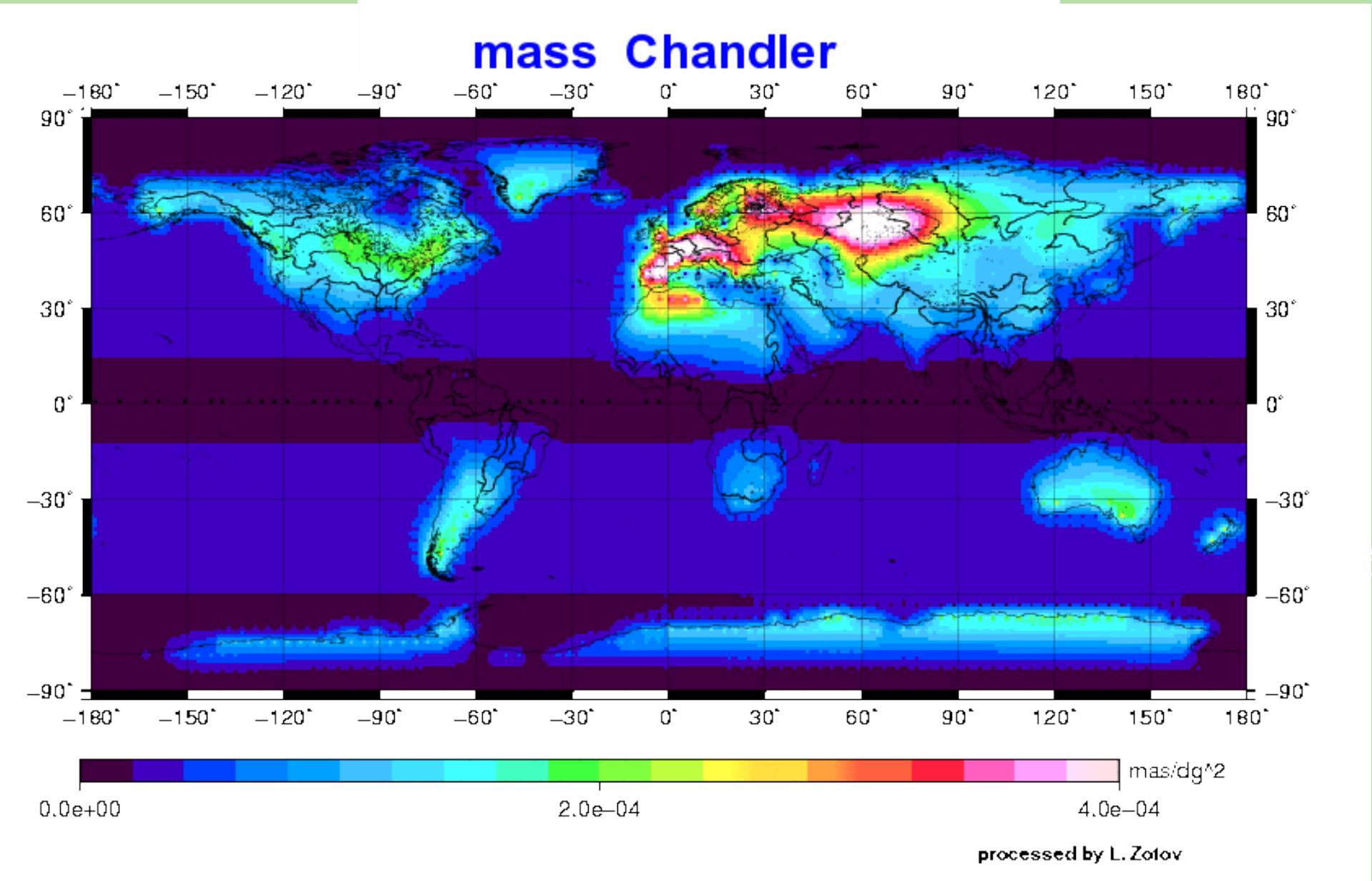
$$W(\omega) = \frac{\sigma_c}{\sigma_c - \omega}$$

В частотной области

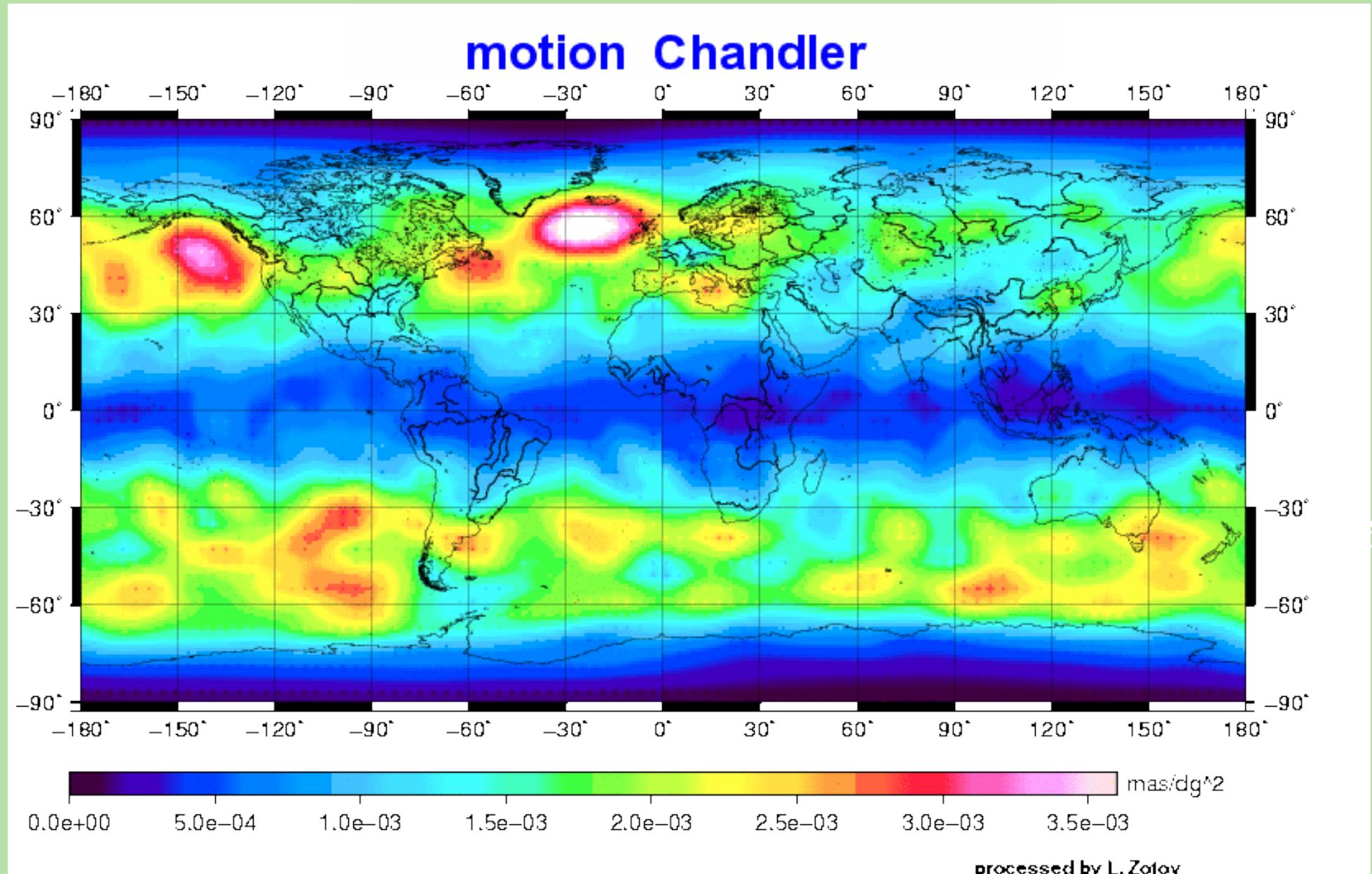
# Чандлеровское колебание $p$ и его возбуждение $\chi$



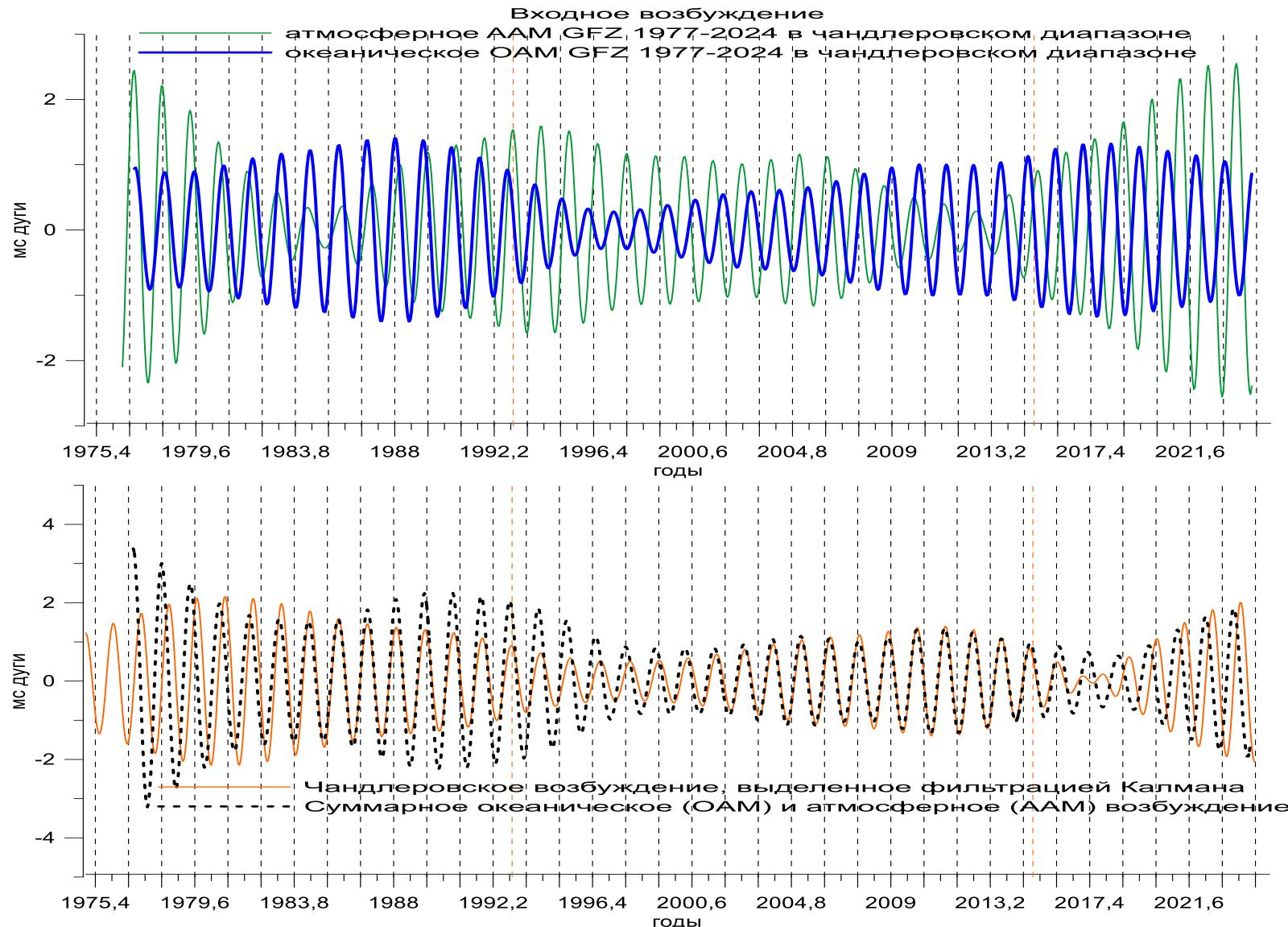
МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В  
ЧАНДЛЕРОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ECMWF ДАВЛЕНИЕ



МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В ЧАНДЛЕРОВСКОМ  
ДИАПАЗОНЕ ECMWF ВЕТЕР

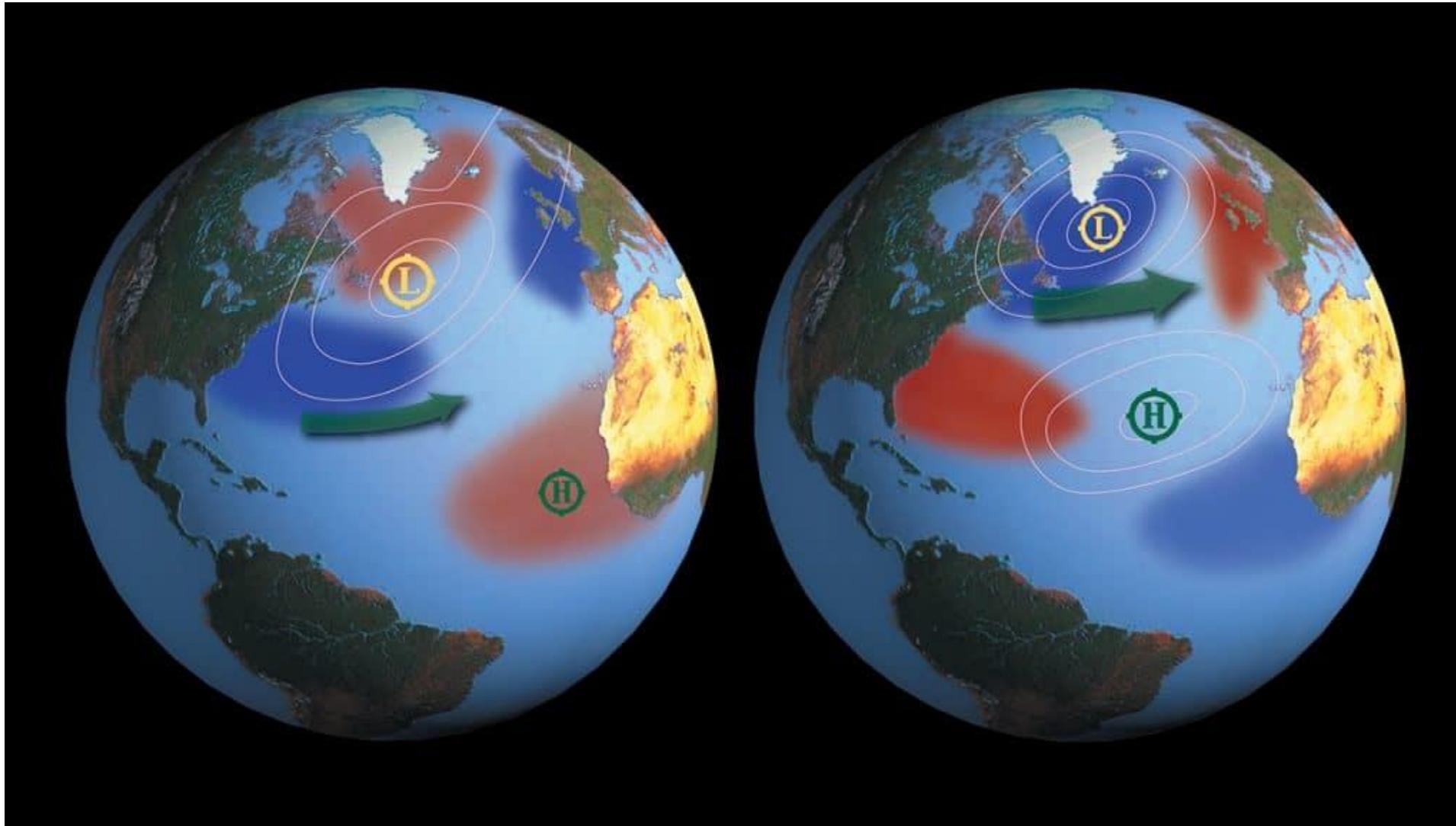


# Вклад атмосферы и океана в Чандлеровское возбуждение

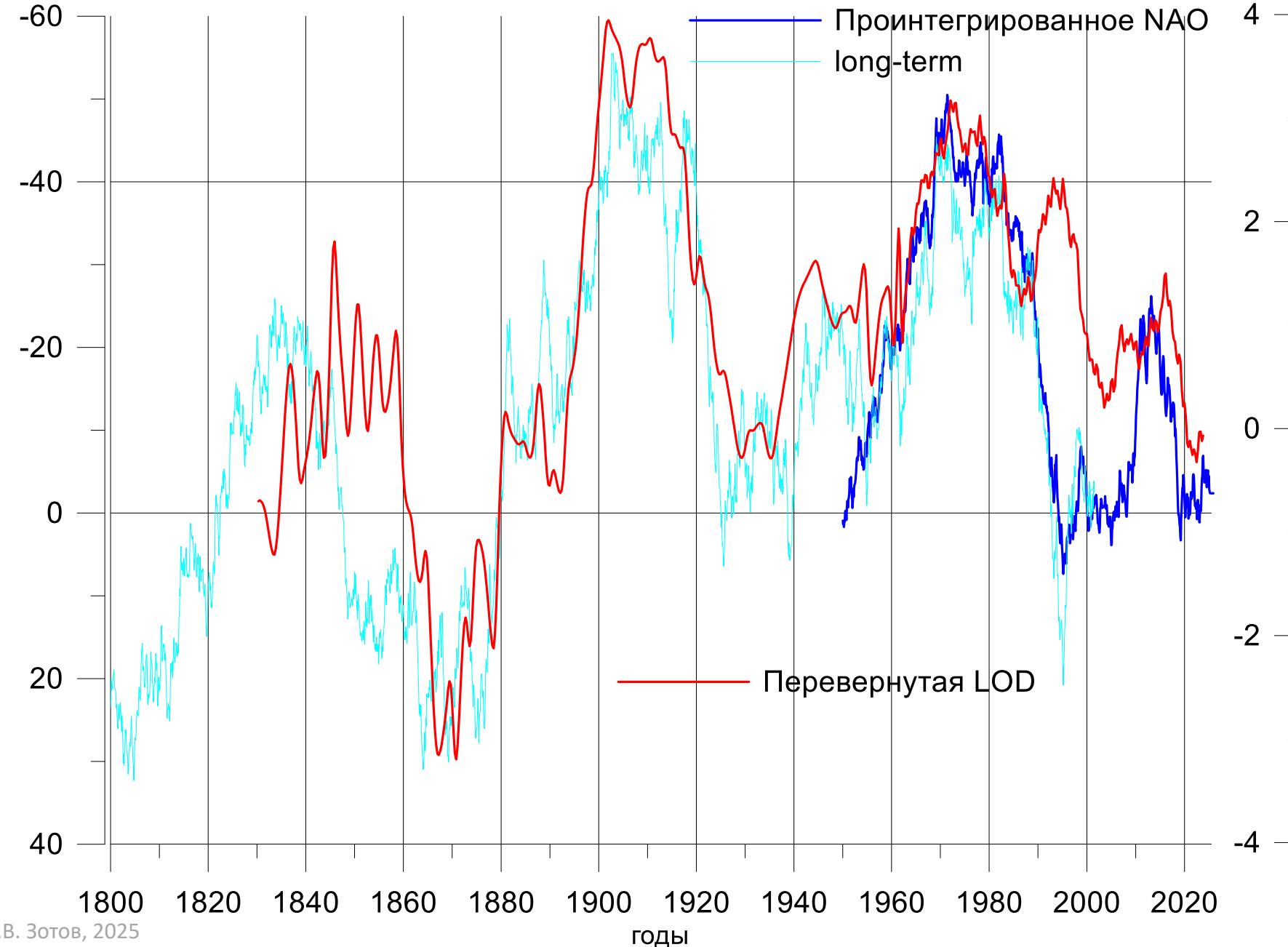


# Северо-Атлантическое колебание САК

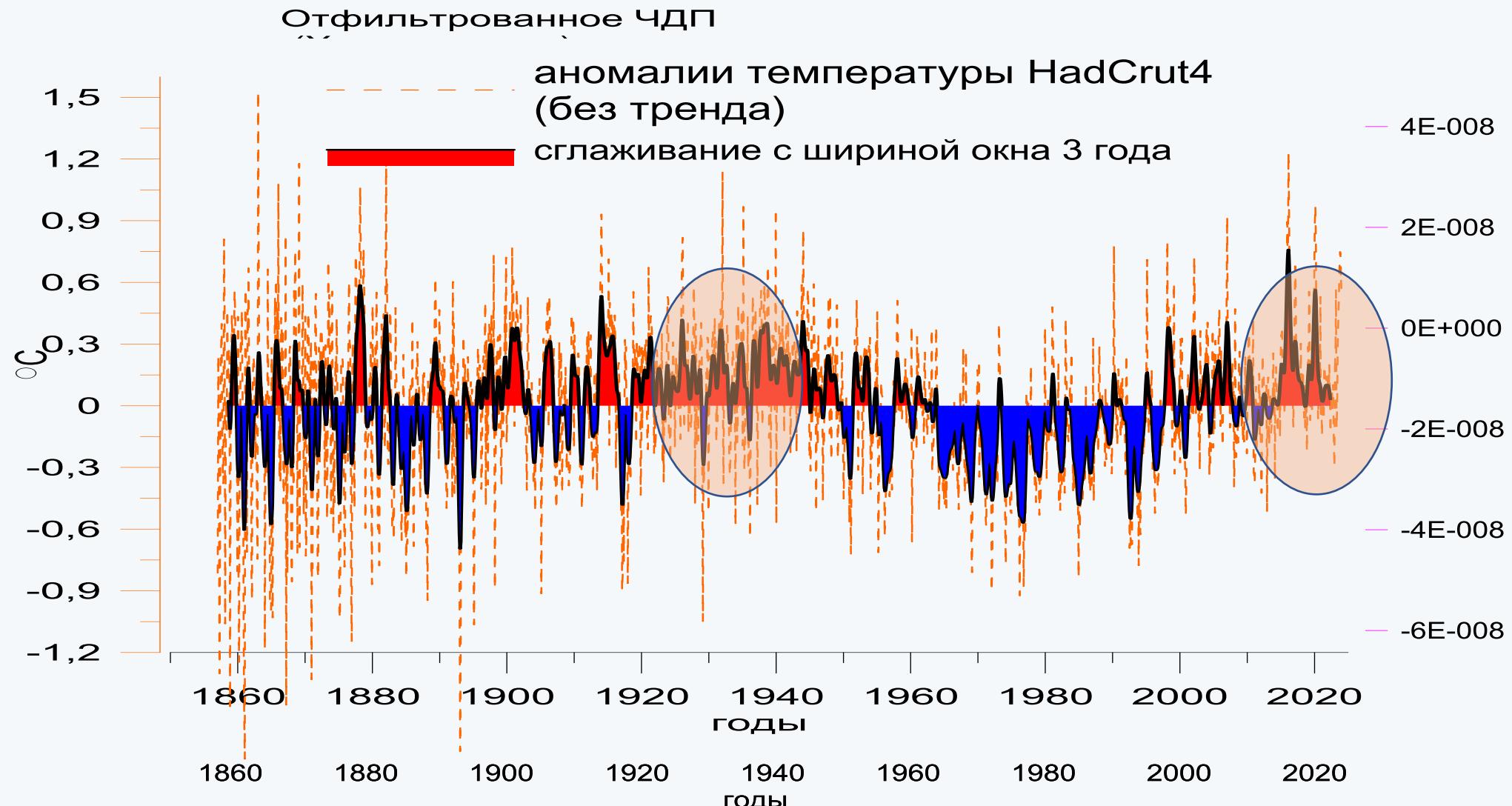
---



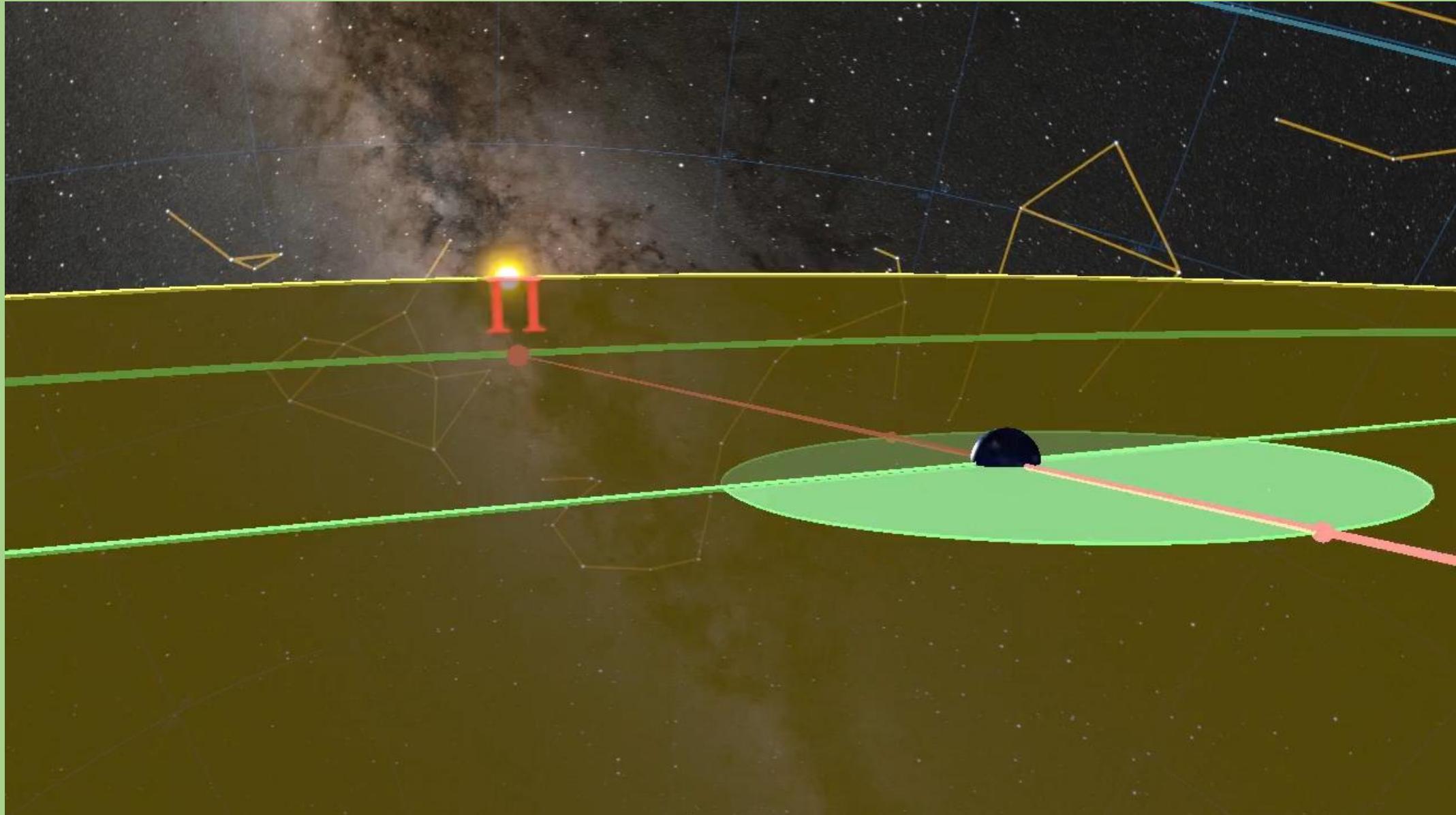
# Северо-атлантическое колебание NAO и длительность суток LOD

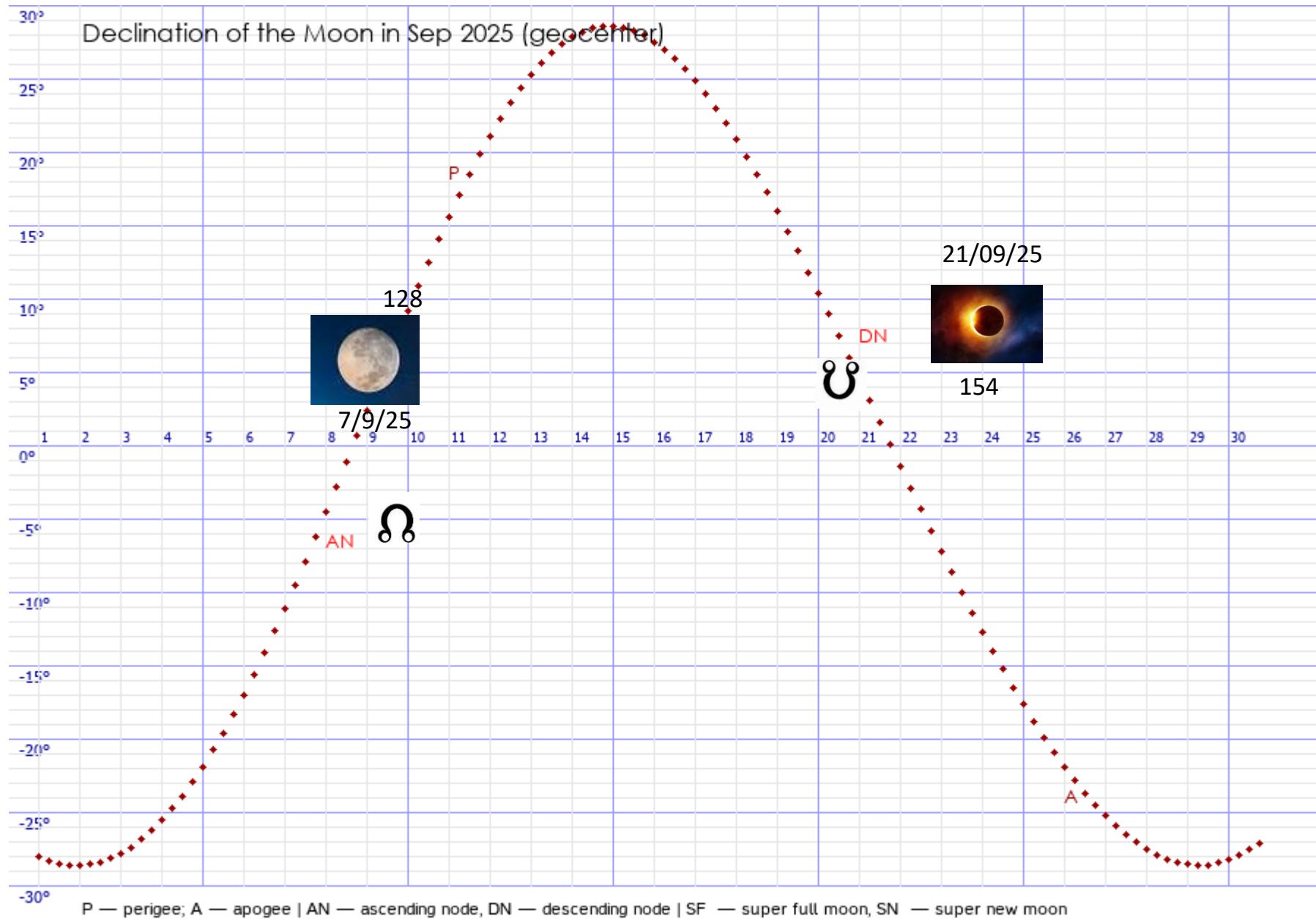


# Синхронное поведение Чандлеровского колебания, скорости вращения Земли и многолетнего атлантического колебания

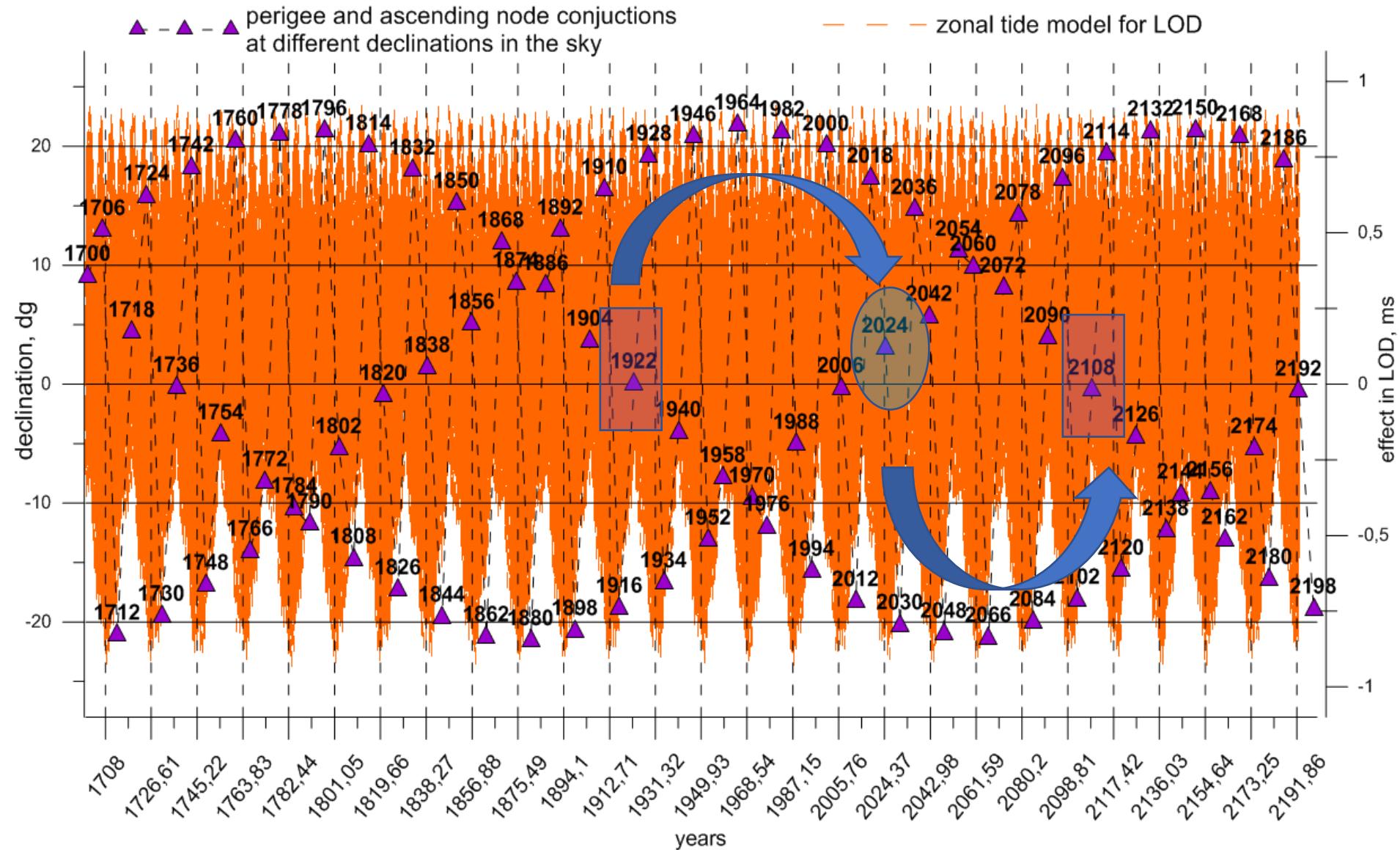


# Движение перигея и узлов навстречу друг другу

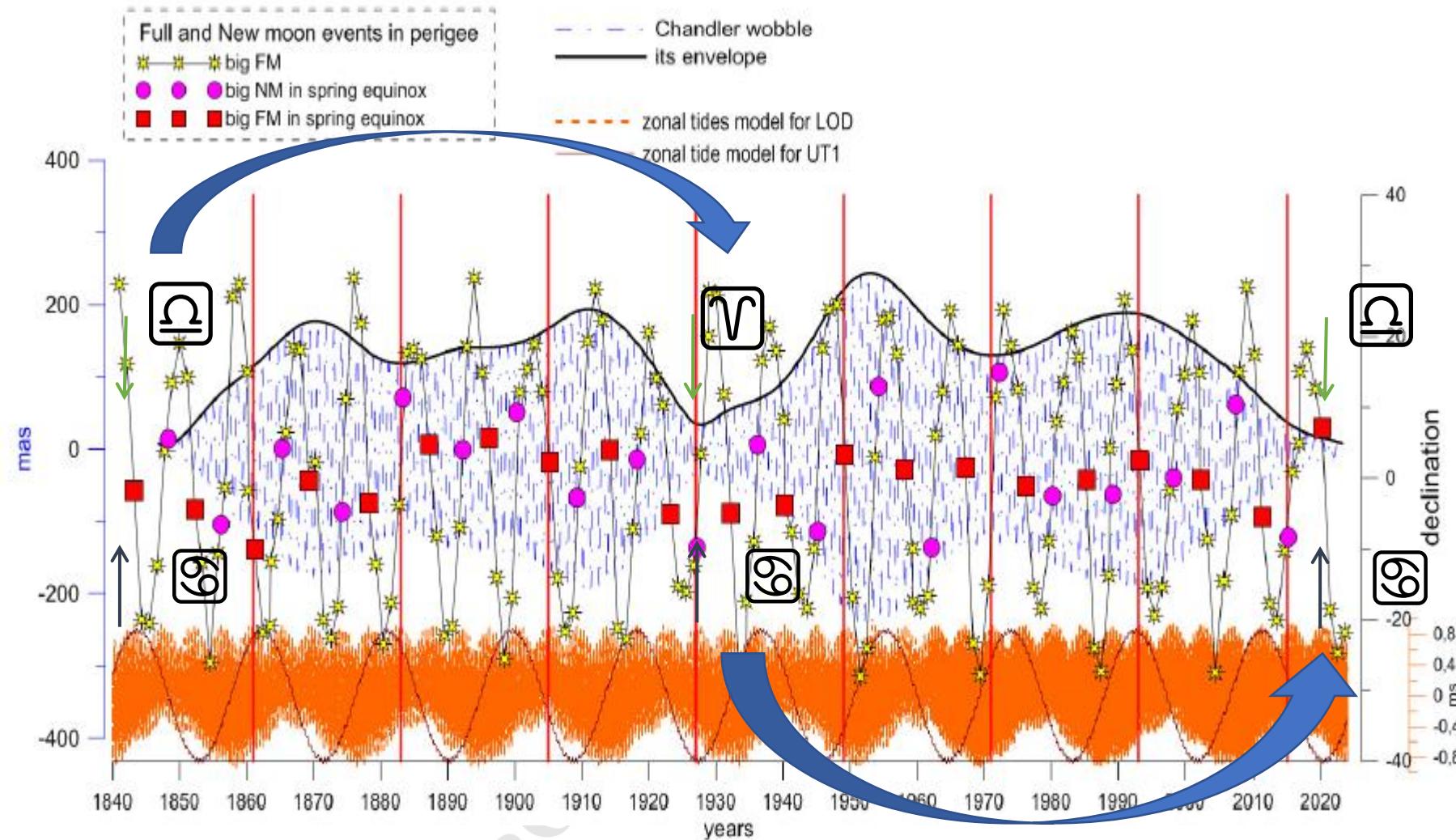




# Встречи перигея и узлов каждые 6 лет и их склонения



# Возможная причина аномалий Чандлеровского колебания и LOD



## Problems of Geocosmos

Proceedings of the XV Conference and School  
(St. Petersburg, Russia, April 22–26, 2024)

## Earth Rotation Variations and the Moon Apsidal-Nodal Effects

Leonid Zotov, Nikolay Sidorenkov, and Christian Bizouard

## Выводы

---

- данные GRACE и GFO по гравитационному полю Земли незаменимы для многих геофизических приложений
- гравитационное поле над большими территориями отражает динамику климатических воздействий на ледники, вечную мерзлоту, океан, водный баланс суши
- в 2020-е годы ряд параметров вращения Земли проявил аномальное поведение: декадное ускорение вращения Земли совпало с затуханием Чандлеровского колебания полюса
- данные космической гравиметрии по первым коэффициентам гравитационного поля Земли – сжатию  $J_2$  и асимметрии  $C_{21}$ ,  $S_{21}$  помогают определить вклад перераспределений масс в аномалии вращении Земли
- массовая компонента по данным GRACE и GRACE-FO хорошо объясняет дрейф полюса, но не может объяснить аномалии ускорения вращения Земли и исчезновение Чандлеровского колебания, произошедшее с 2022 года

