

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?

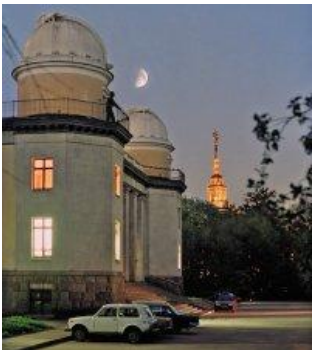
Зотов Л.В.^{1,2} Фролова Н.Л.³, Орехова А.А.⁴

¹ГАИШ МГУ ²МИЭМ НИУ ВШЭ

³Географический ф-т МГУ ⁴Бакинский филиал МГУ

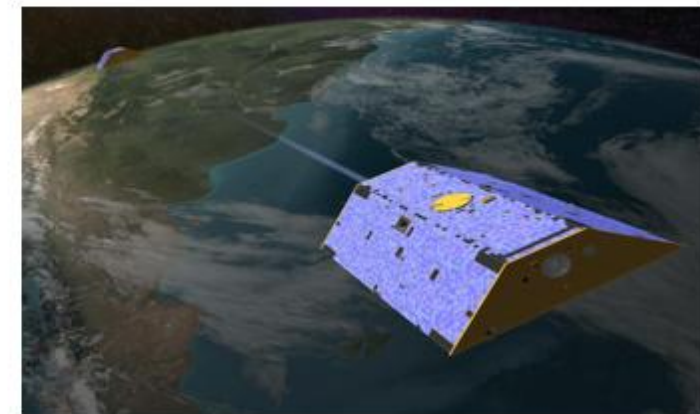
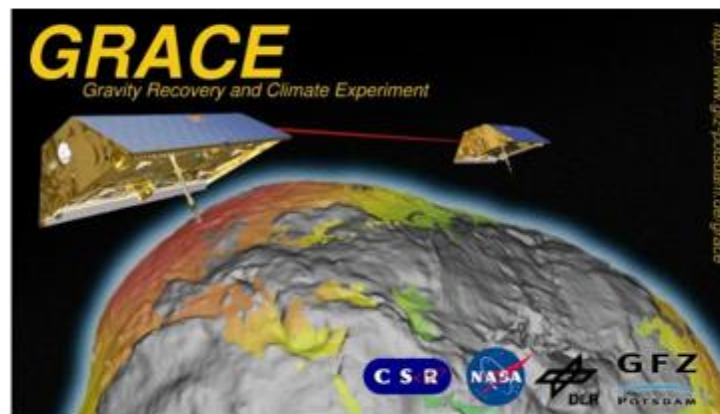
ИКИ РАН

12 ноября 2025 г



Гравиметрия

GRACE и GFO



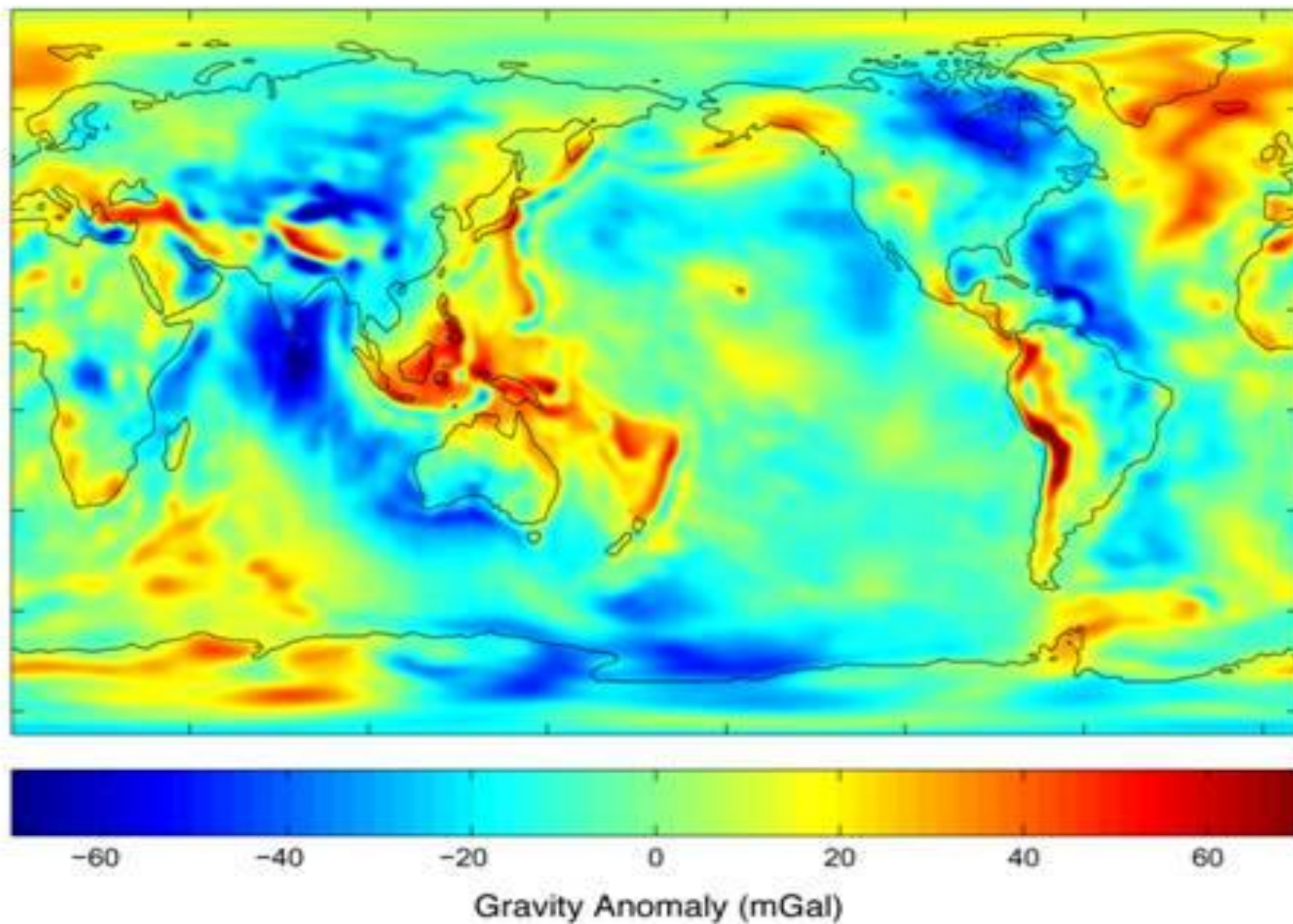
GRACE — совместная спутниковая миссия NASA и DLR, направленная на изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций.

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

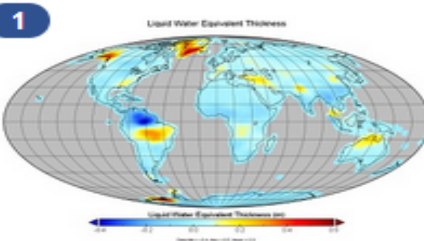
GRACE прекратил работу в 2017 году.

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

Гравитационное поле Земли GGM03s



Prev **1** Next



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

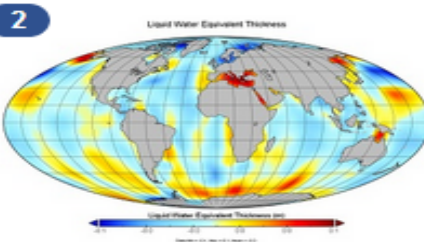
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA

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](#)



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

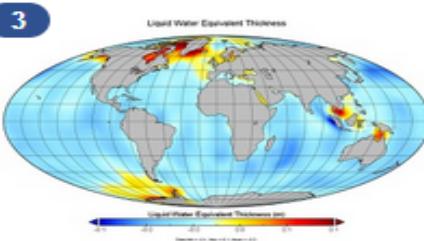
Platform/Sensor: GRACE-FO/GRACE-FO ACC , GRACE-FO/GRACE-FO KBR , GRACE-FO/GRACE-FO SCA

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](#)



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

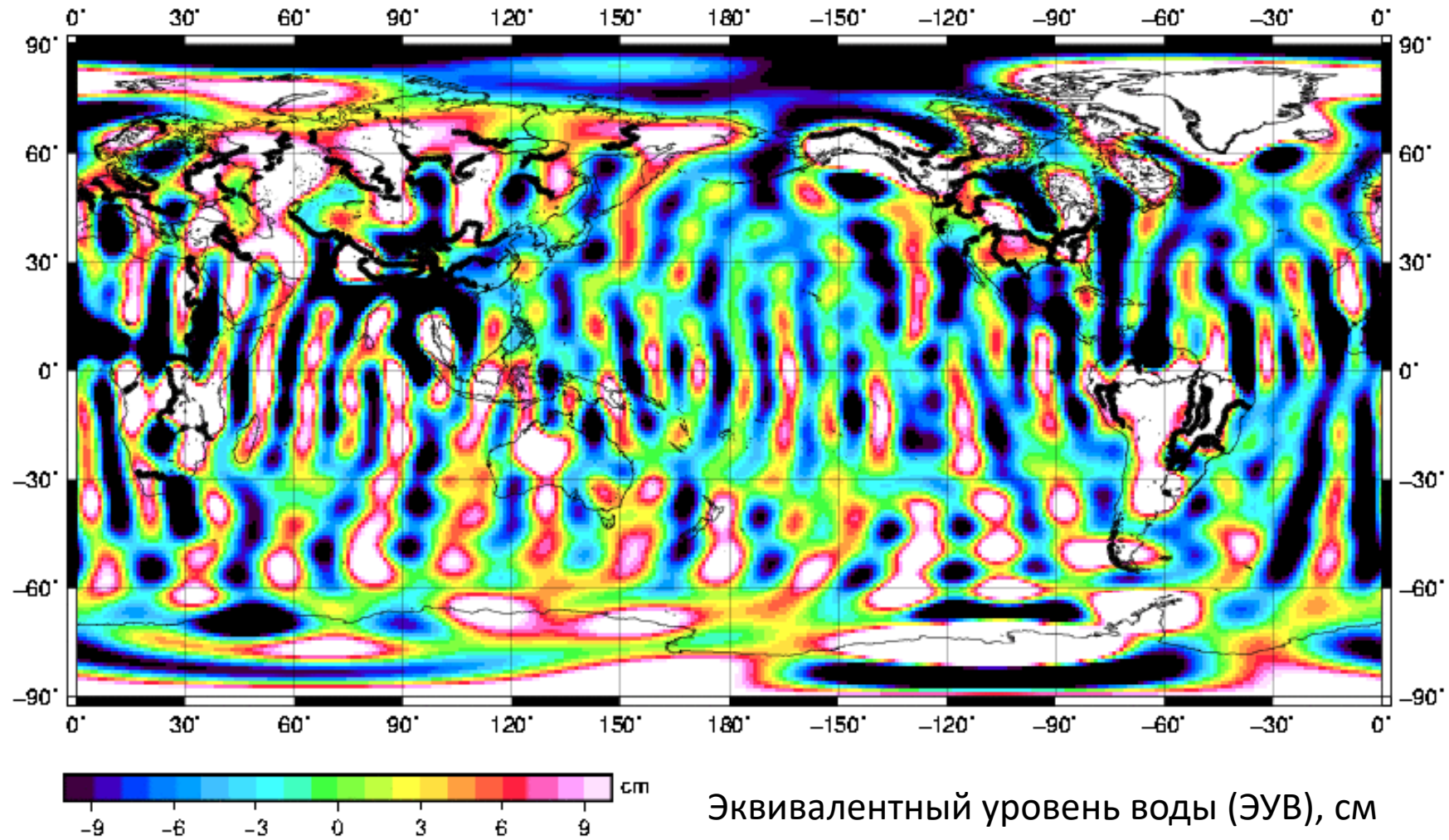
$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi),$$

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 сигнала

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

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

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

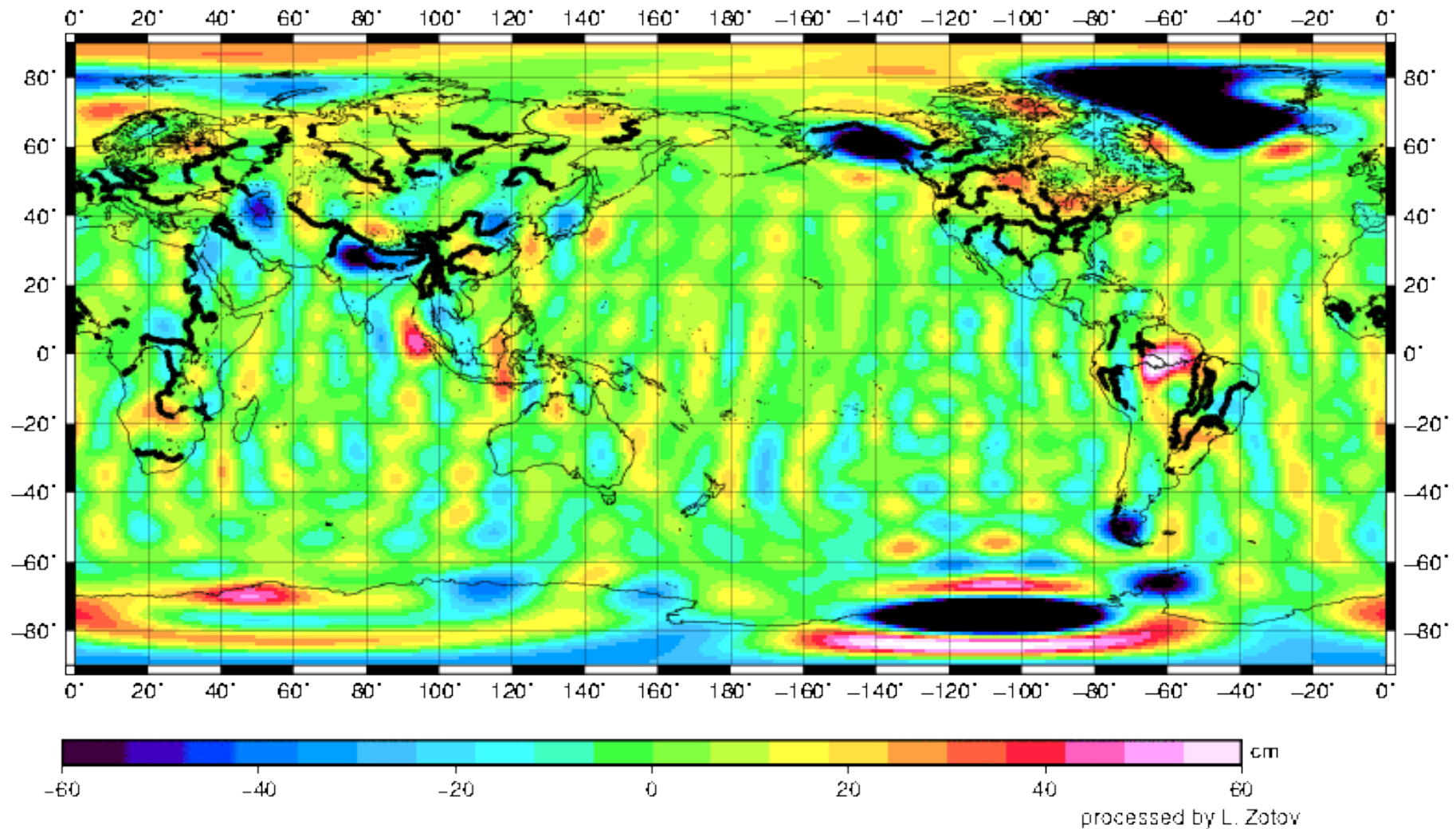
И усреднением вдоль побочных диагоналей (Генкелизацией) восстанавливается компонента сигнала

4) Сходные сигналы группируются в Главные Компоненты (Principal Components)

PC1, PC2, PC3...

Тренды перераспределения масс в данных миссии GRACE

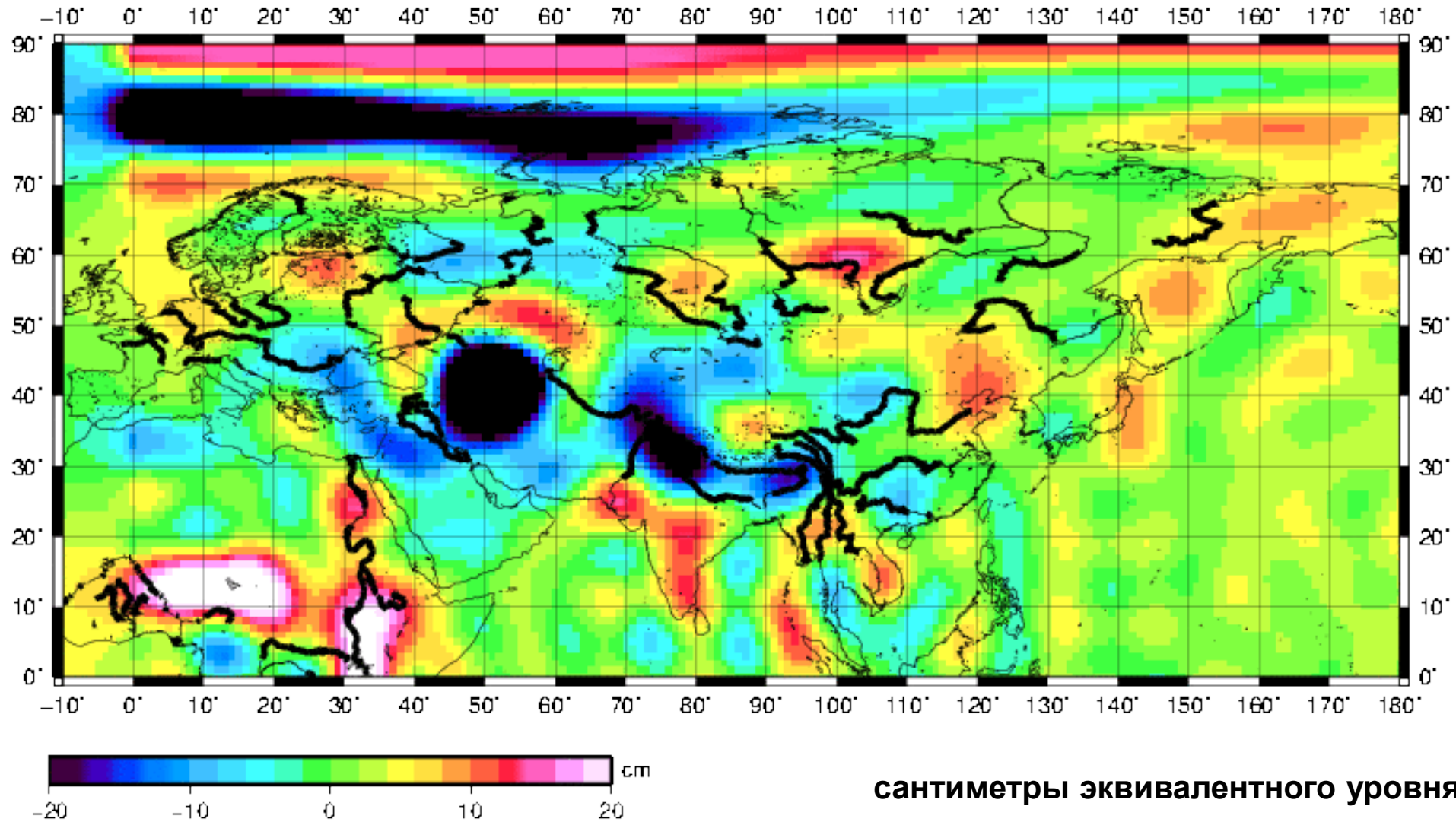
2017-2003 RL 06



Изменения масс вследствие климатических и других факторов

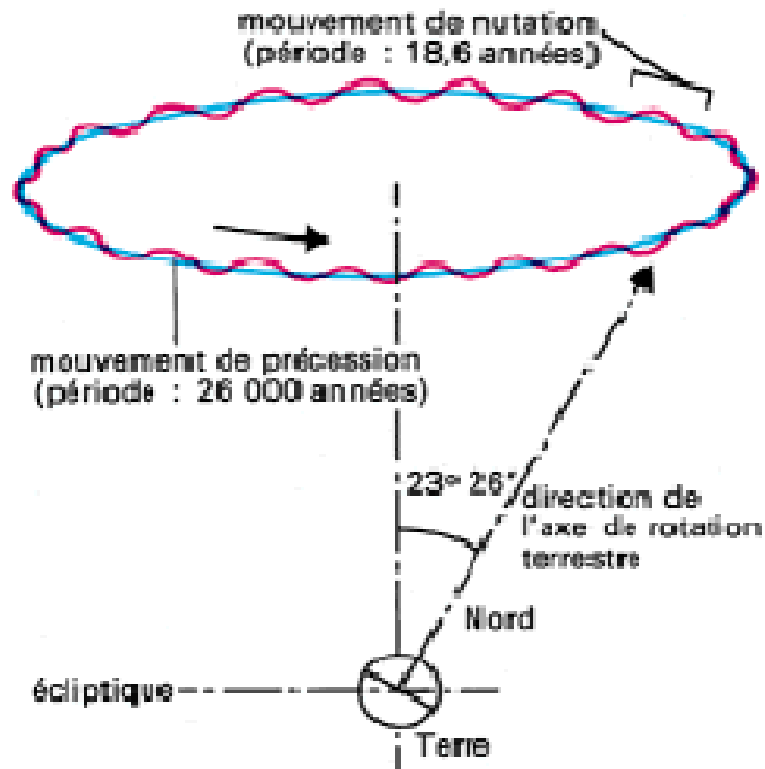
Тренды перераспределения масс Евразии по GRACE-FO

2025-2018

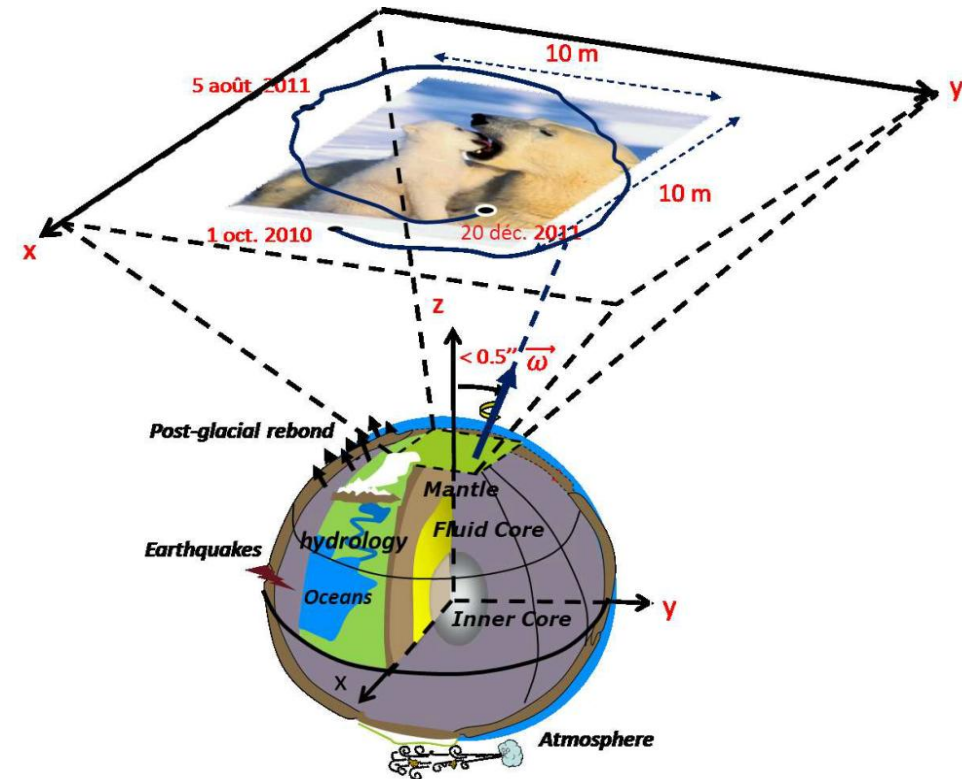


Нутация и движение полюса

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

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

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

Уравнение для углового момента
в неподвижной в подвижной

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

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

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

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

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

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

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

$$\Psi_1 = \frac{1}{\Omega^2(C - A)} \left(\Omega^2 c_{13} + \Omega \dot{c}_{23} + \dot{h}_2 + \Omega h_1 - \Lambda_2 \right),$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{\Omega^2(C - A)} \left(\Omega^2 c_{23} - \Omega \dot{c}_{13} - \dot{h}_1 + \Omega h_2 + \Lambda_1 \right),$$

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

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

частота Эйлера

комплексная Чандлеровская частота

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

период $T=433$ сут $f_c=365.25/433$ 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

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

Параметры ориентации Земли

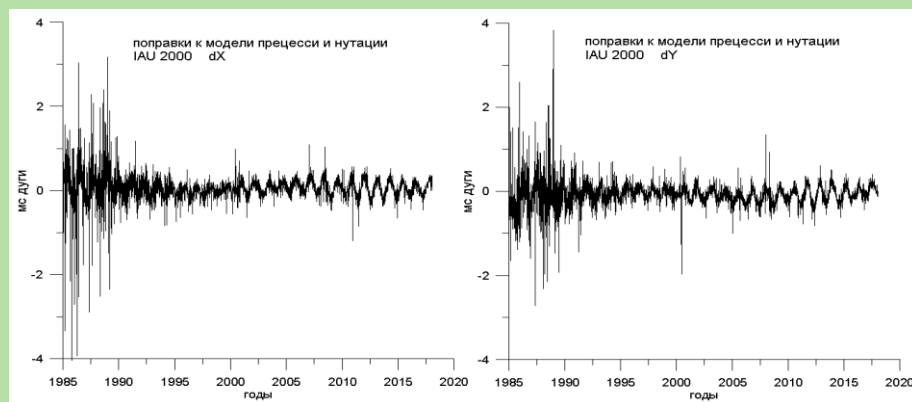
x, y координаты полюса

UT1-UTC

dX, dY

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

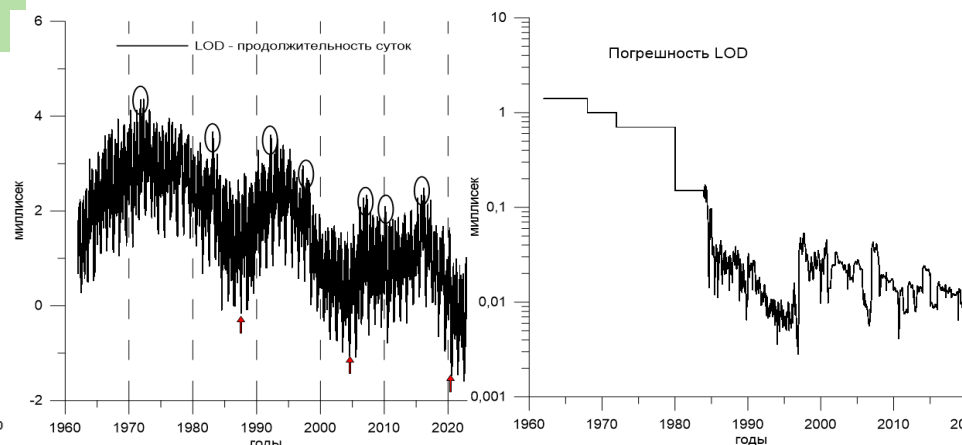
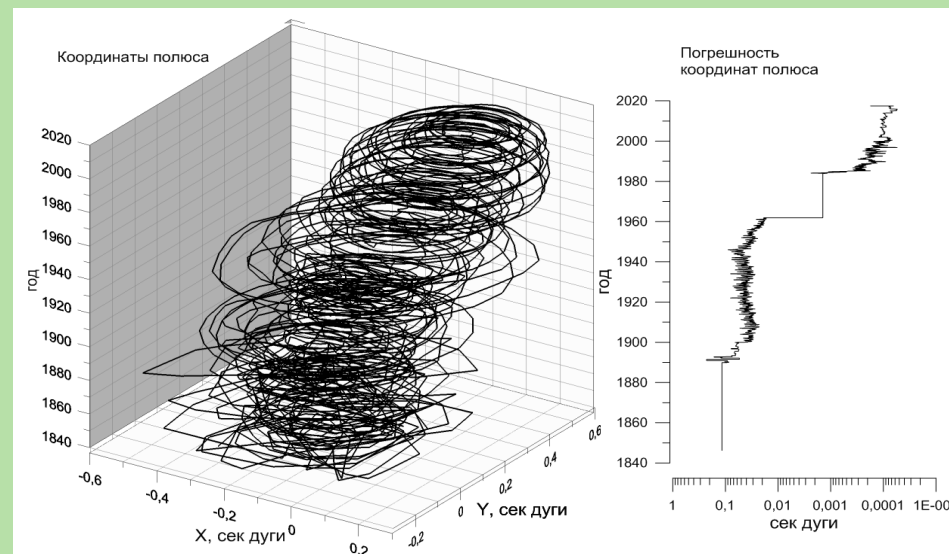
$$\Delta LOD = \frac{2\pi \cdot k}{\Omega(1 + m_3)} - \frac{2\pi \cdot k}{\Omega} \approx -\overline{LOD}m_3,$$



Поправки к углам прецессии и нутации

x, y координаты полюса

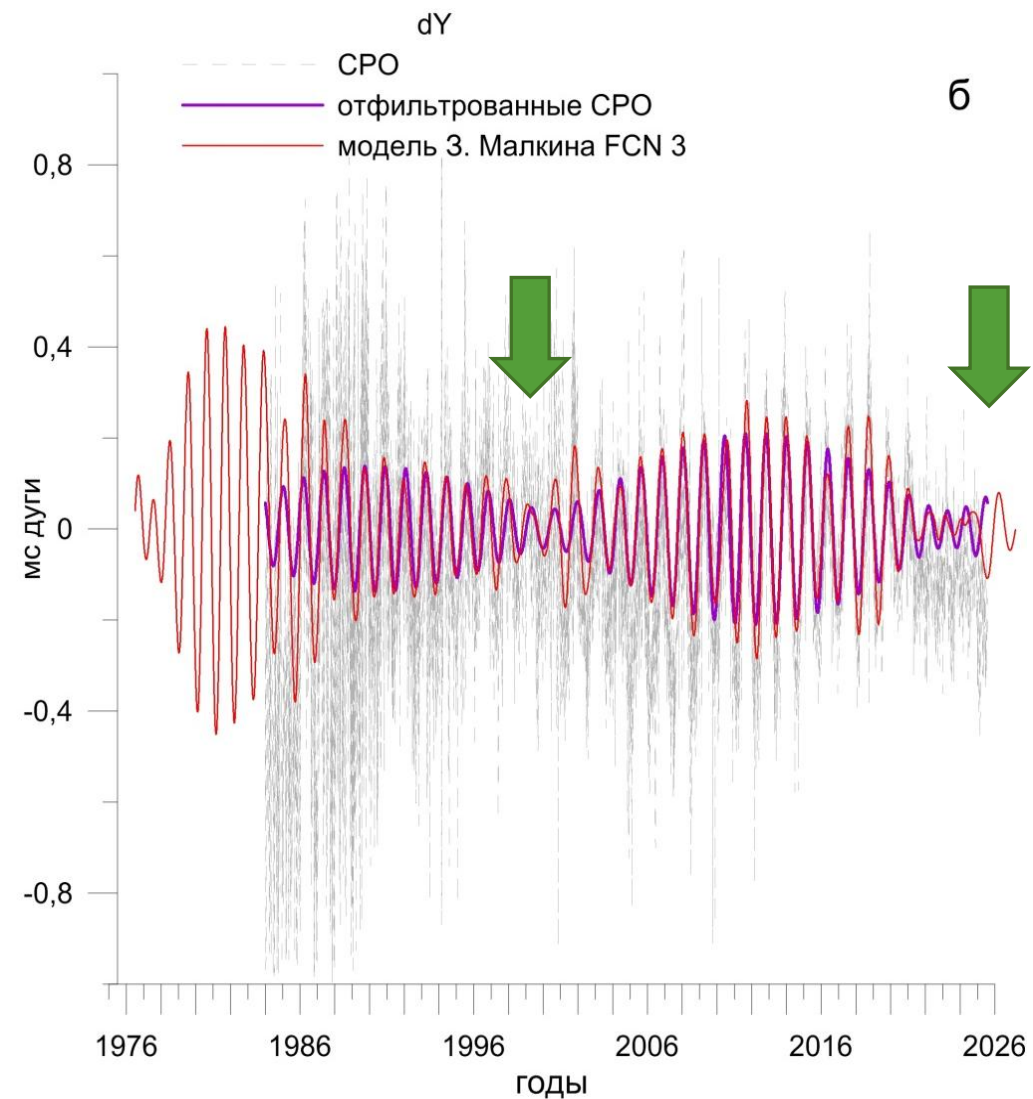
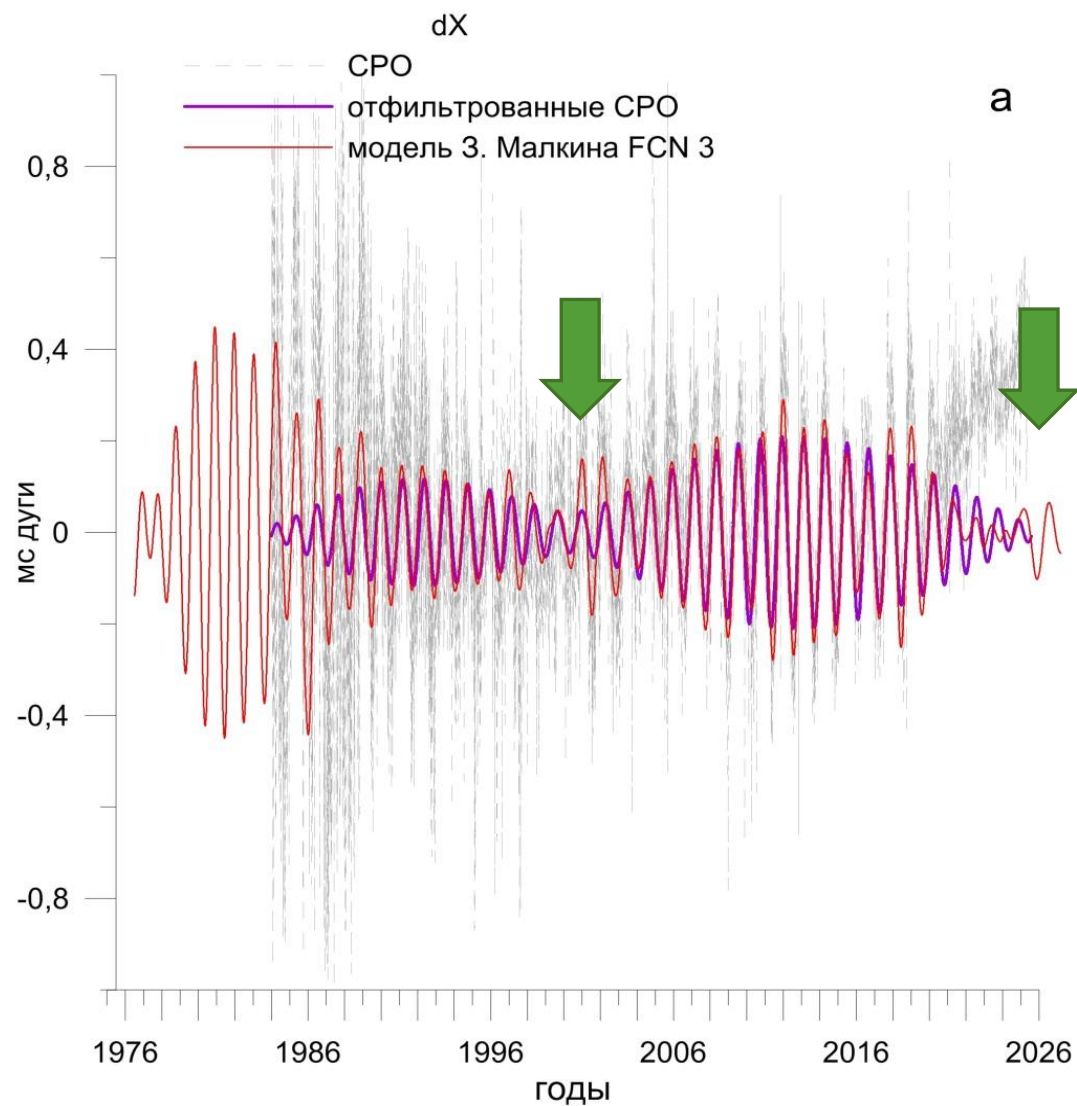
возрастание точности



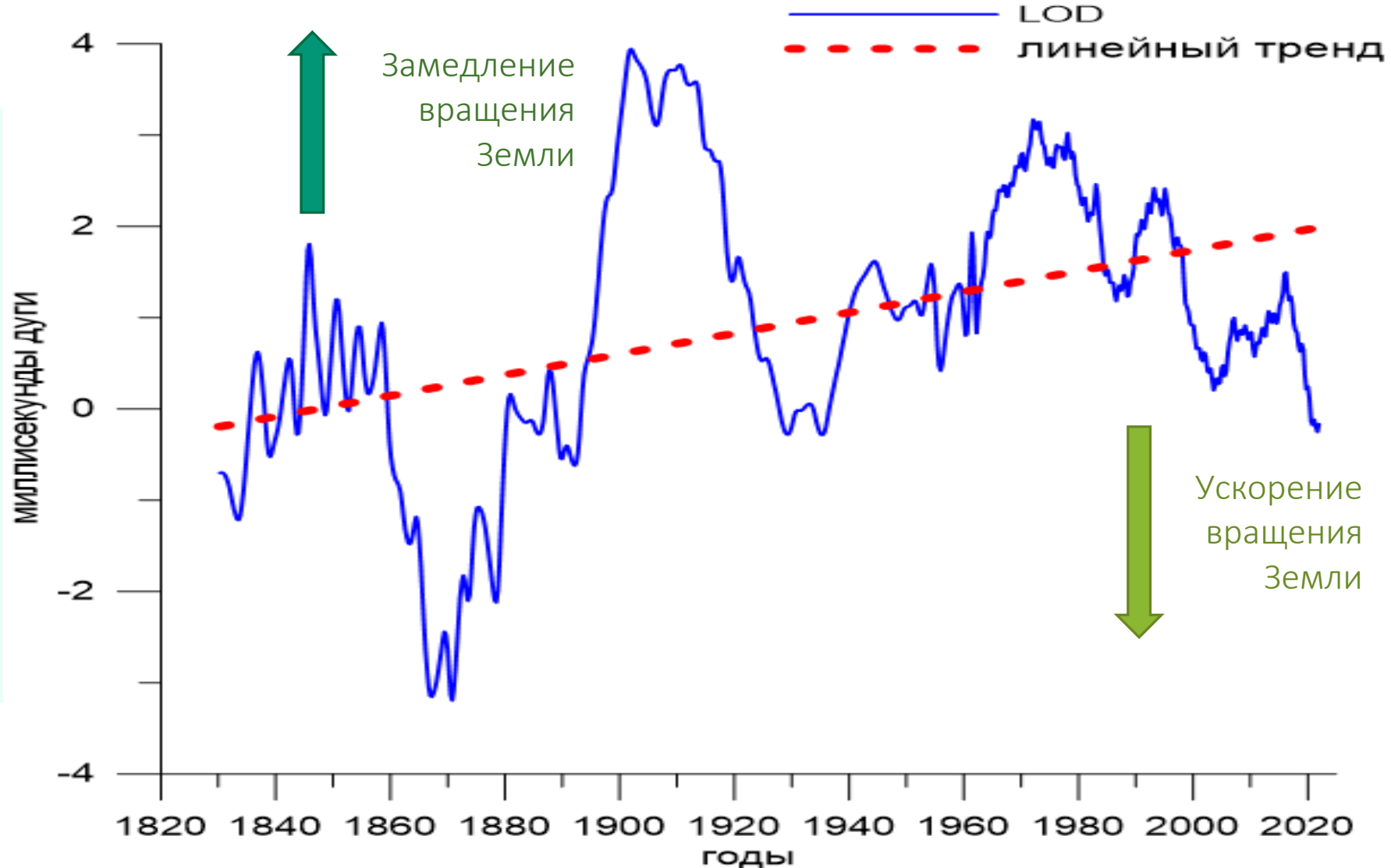
длительность суток
LOD

точность
наблюдений

Ослабление сигнала свободной нутации ядра FCN

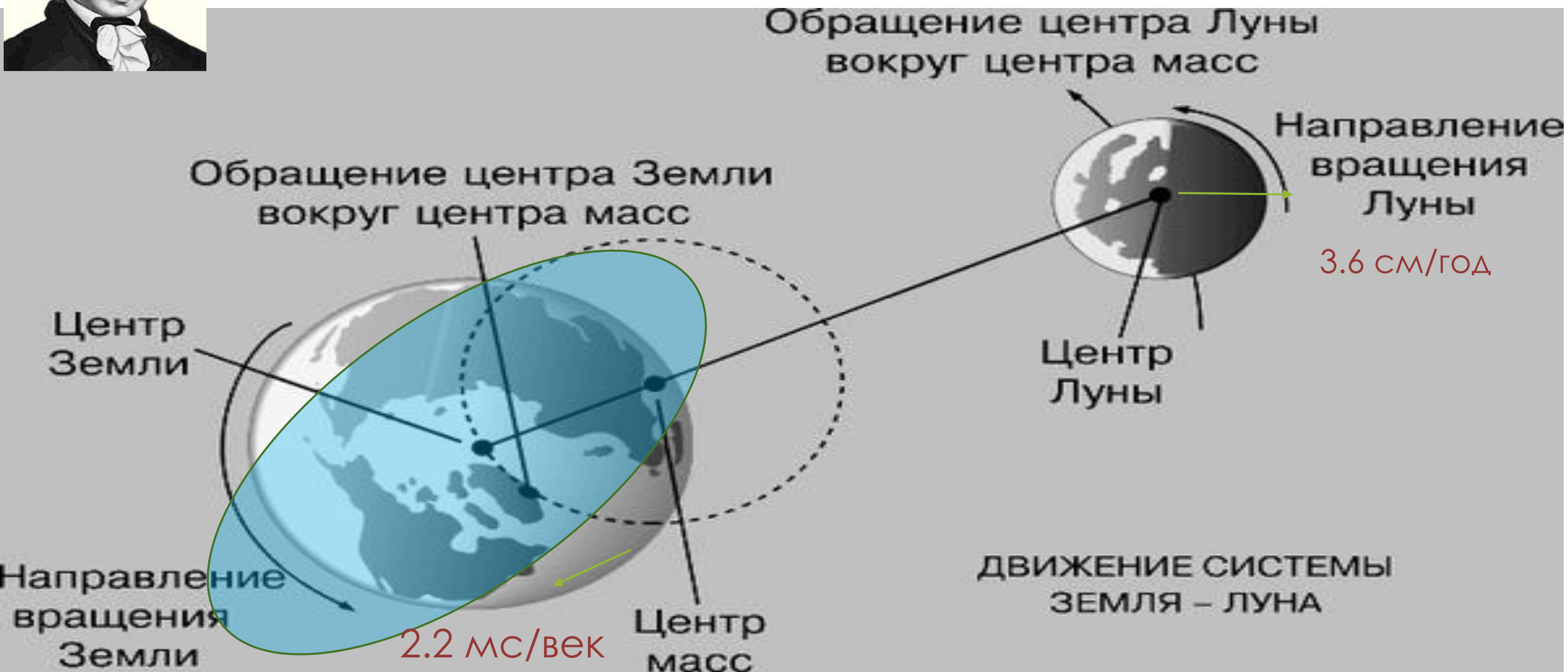


Долговременные изменения длительности суток Length of Day LOD





Иммануил Кант предсказал
торможение Земли в 1754 г

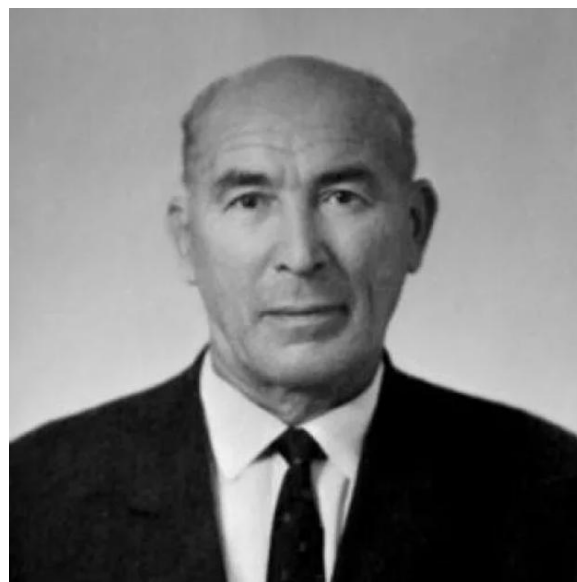


Часть 1

ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИНЫ СУТОК И ДЕФОРМАЦИЯ ЗЕМЛИ¹

Н. Н. Парийский



¹ Астрон. журн. 1945, Т.22, вып. 2, С.106-121.

Луну, которые учитываются теорией. Вторые две причины связаны между собой — это замедление вращения Земли и лунные приливы. Точнее, на замедление вращения Земли действуют только их суммарный эффект. (Точнее, на замедление вращения Земли действуют только лунные приливы, а на замедление движения Луны — только лунные приливы.)

Если мы воспользуемся упрощенной теорией, которой пользовался Джеффрис, считая орбиты Земли и Луны круговыми, лежащими в одной плоскости, плоскости экватора и эклиптики 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 моментов количества движения и 4) закона сохранения энергии E , то получим четыре уравнения:

$$\begin{aligned} n^2 a^3 &= G(M + m), \\ n_0^2 a_0^3 &= G(M + m + m_0), \\ I\omega + \mu n a^2 + \mu_0 n_0 a_0^2 &= \text{const}, \\ E &= \frac{1}{2} I \omega^2 - \frac{1}{2} \mu n^2 a^2 - \frac{1}{2} \mu_0 n_0^2 a_0^2 + \text{const}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_0 — масса Солнца, n_0 — средняя угловая скорость движения и a_0 — большая полуось орбиты центра тяжести системы Земля—Луна, ω — угловая скорость вращения Земли, а

$$\mu = \frac{Mm}{M+m} \cong m, \quad \mu_0 = \frac{(M+m)m_0}{M+m+m_0} \cong M. \quad (2)$$

Считая пока, что момент инерции Земли I не меняется, мы для связанных между собой изменений ω , n и n_0 будем иметь уравнения (в приближенной теории)

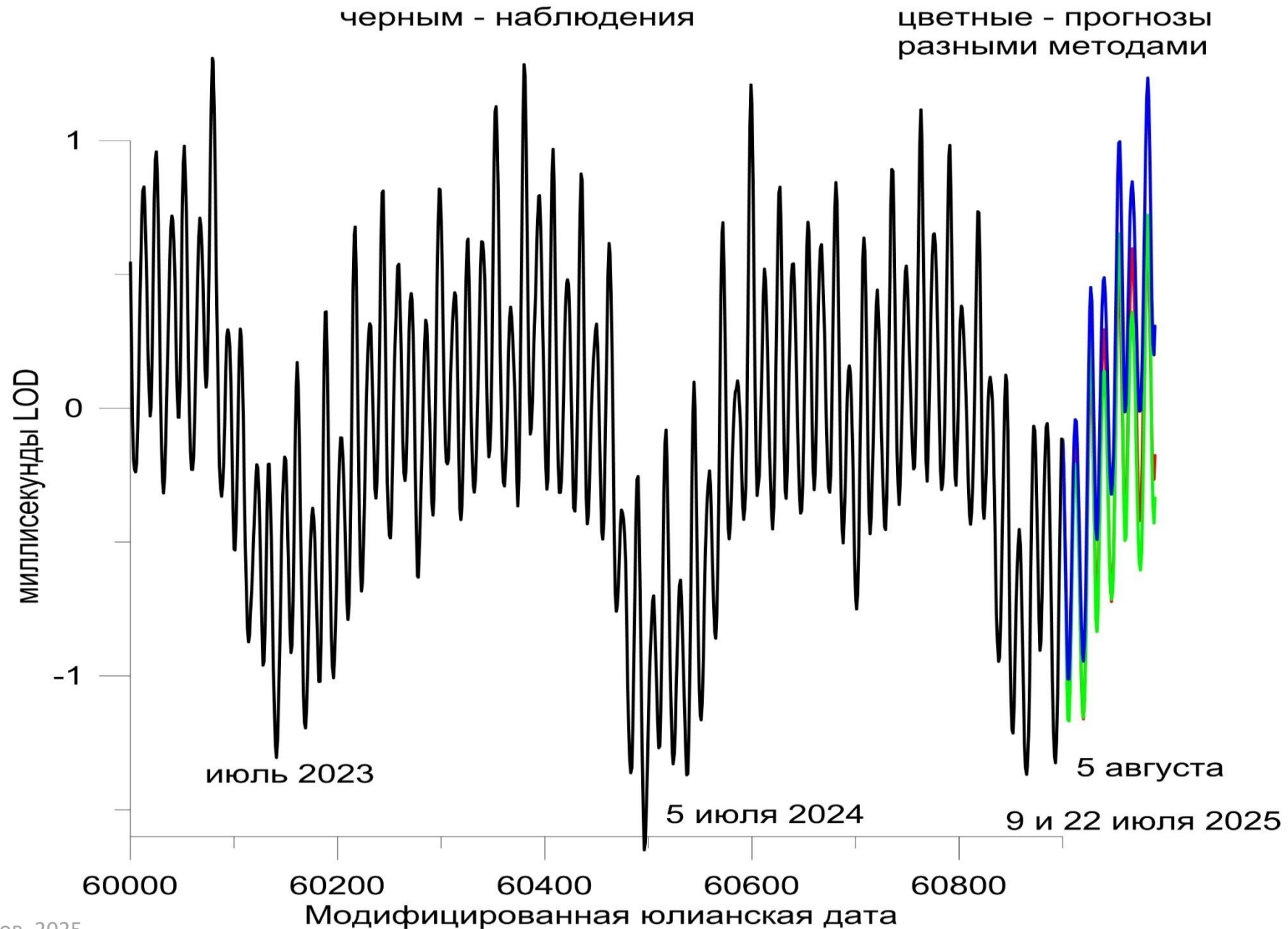
Геофизические процессы, влияющие на вращение Земли

от 1 до 1 000 000 лет



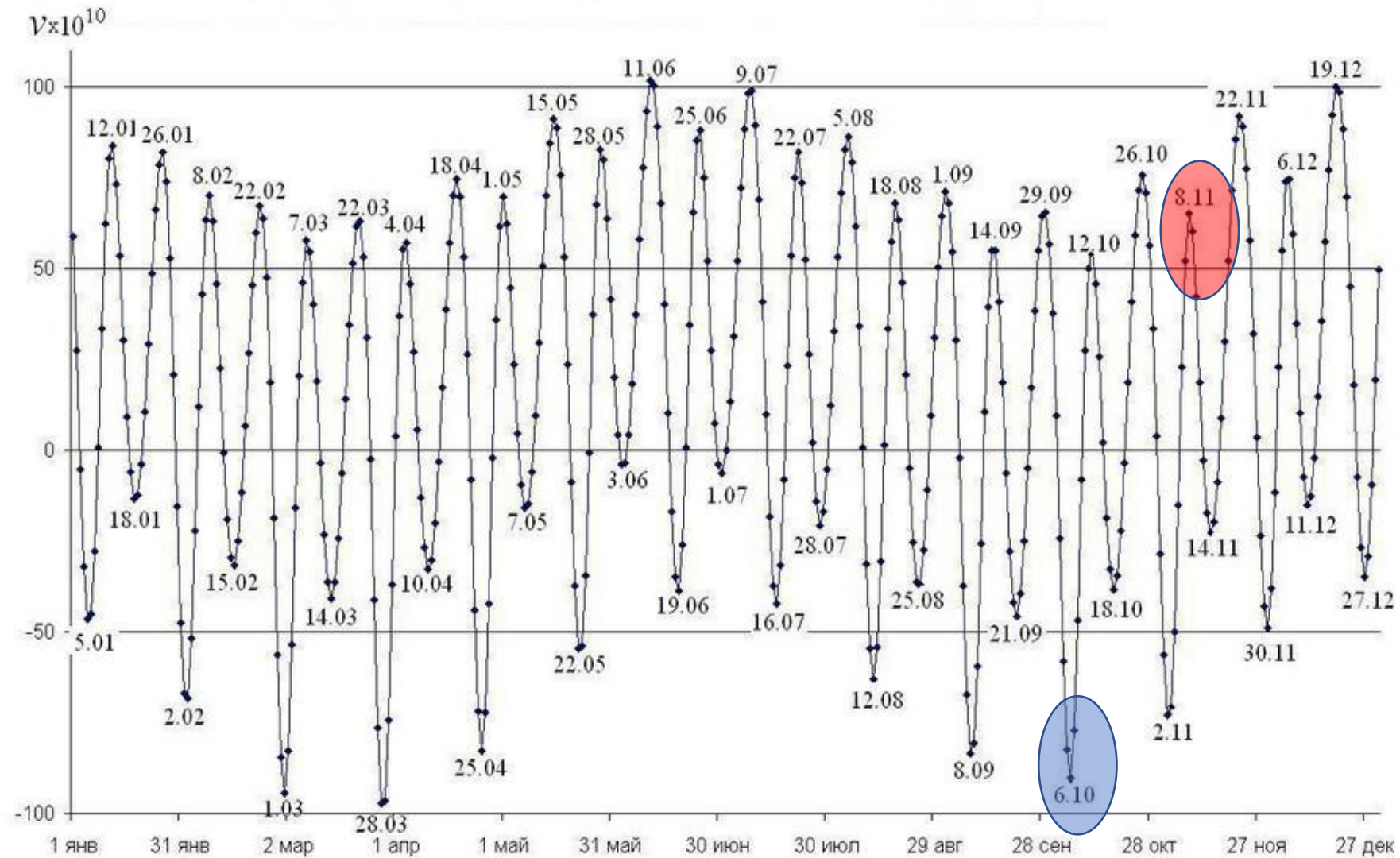
credit: C. Bizouard

Вращение Земли летом 2025 года



ГЕОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ПОГОДА

Приливные колебания угловой скорости вращения Земли в 2025 г.





Home / News / Astronomy News / Earth Will Spin Unusually Fast Again in 2025

Earth Will Spin Unusually Fast Again in 2025

Since 2020, Earth has notched up unprecedented gains in day length, and it's set to do so 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.**

BREAKING | INNOVATION > SCIENCE

Get Ready For Began As Ear

By Jamie Carter, Senior Contributor. (

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

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

TOPLINE

Earth could be about to record its 1
faster than at any point since recor
shortest day. Last year, the shortes
close to this again on or close to Ju



The New York Times

Earth Is Spinning Faster and Getting Shorter, for Now

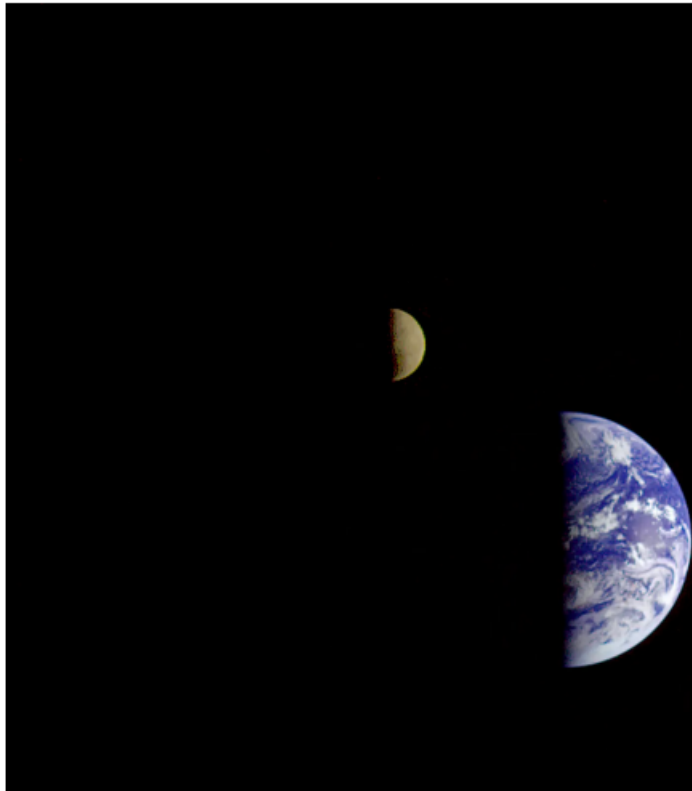
The planet's rotation fluctuates as it travels arou
measurements suggest we're losing more than a
during the long days of summer.



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



Share full article



ELLE

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



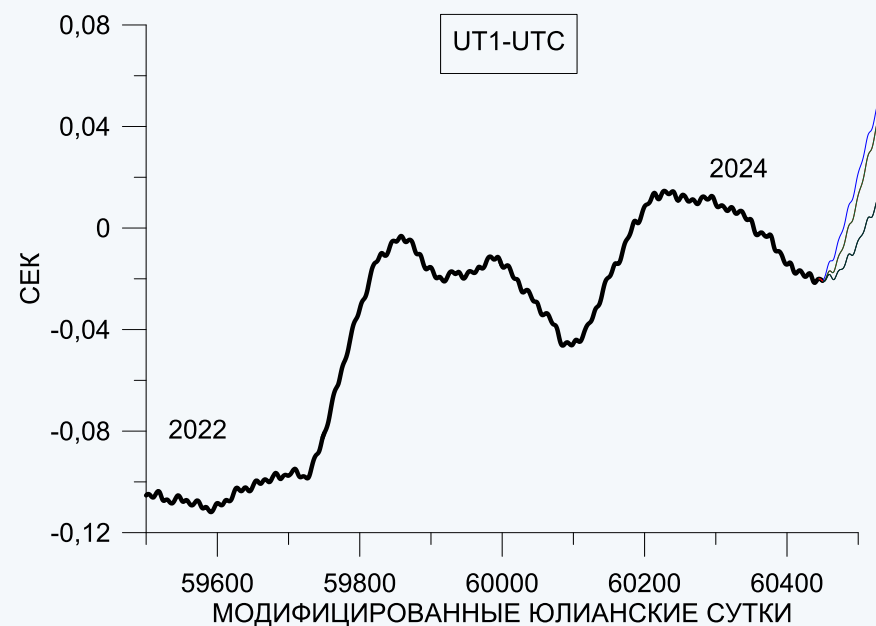
Image: Getty

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЕКУНДА - LEAP SECOND

ВВОДИТСЯ ЧТОБЫ РАССОГЛАСОВАНИЕ ШКАЛЫ
ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЯЕМОГО ПО ВРАЩЕНИЮ ЗЕМЛИ UT И
ШКАЛЫ ВСЕМИРНОГО АТОМНОГО ВРЕМИНИ 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	33s
2009	Jan.	1	-	2012	Jul.	1	34s
2012	Jul.	1	-	2015	Jul.	1	35s
2015	Jul.	1	-	2017	Jan.	1	36s
2017	Jan.	1	-				37s



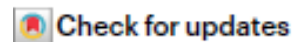
A global timekeeping problem postponed by global warming

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

Received: 4 August 2023

Accepted: 6 February 2024

Published online: 27 March 2024

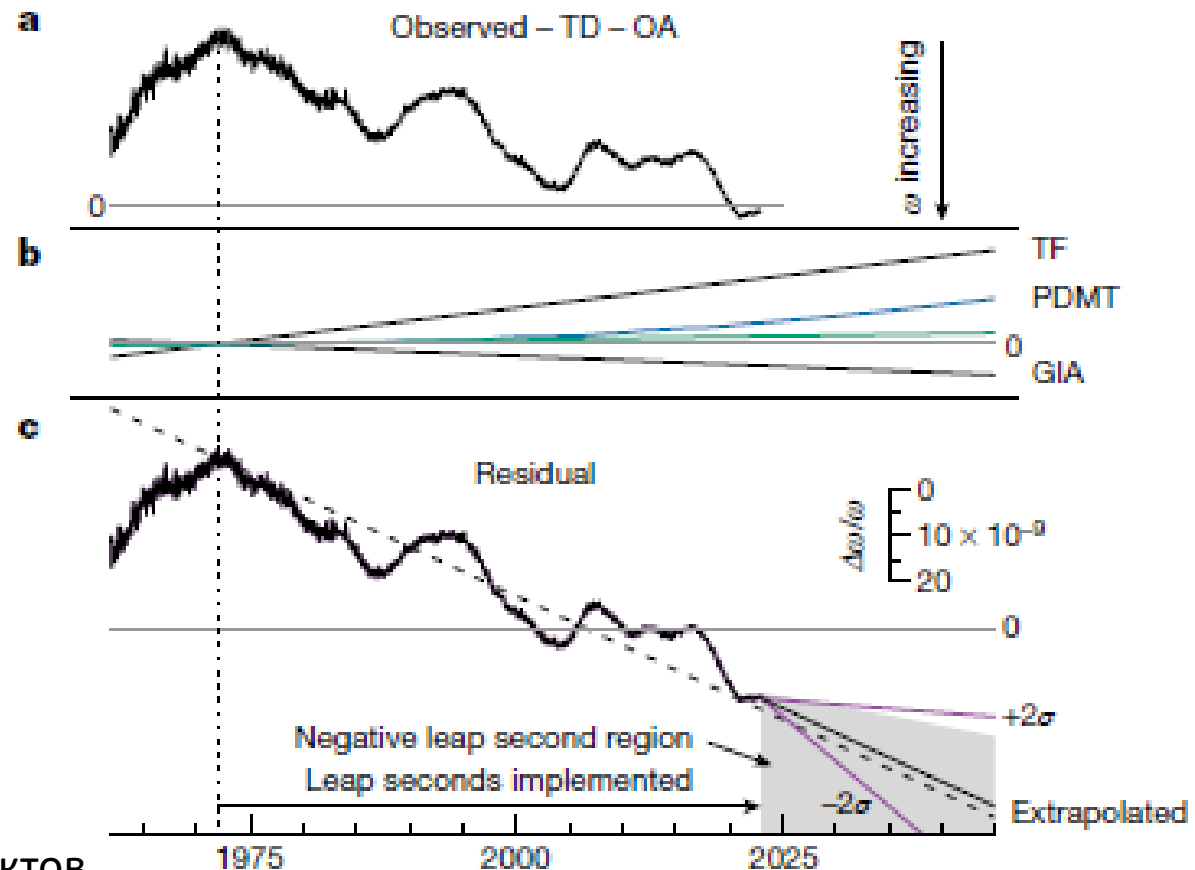


Вверху – кривая LOD
длительности суток

TF – приливное трение
GIA – послеледниковое
поднятие

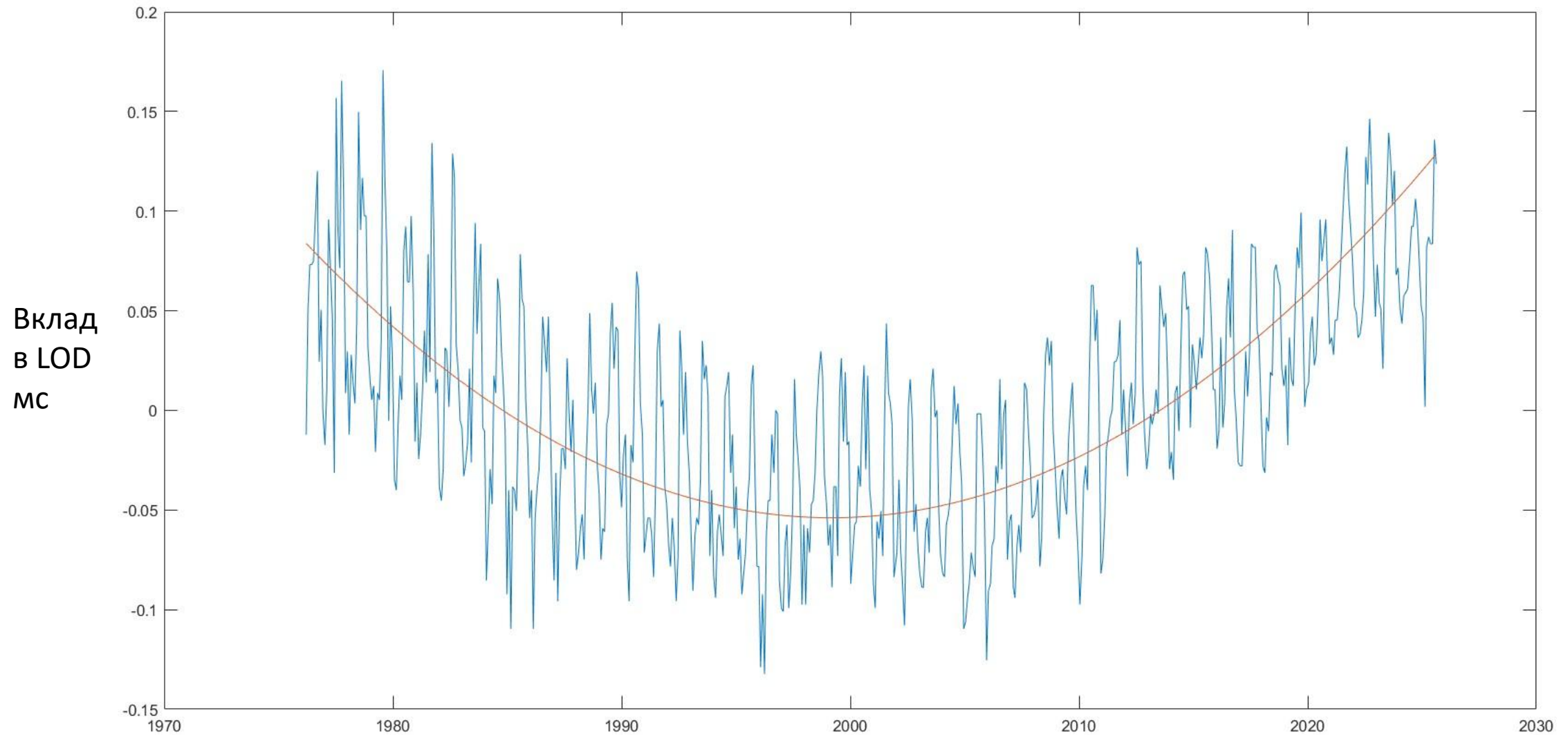
PDMT – перенос масс сегодня

внизу – как шла бы LOD за
вычетом климатических эффектов

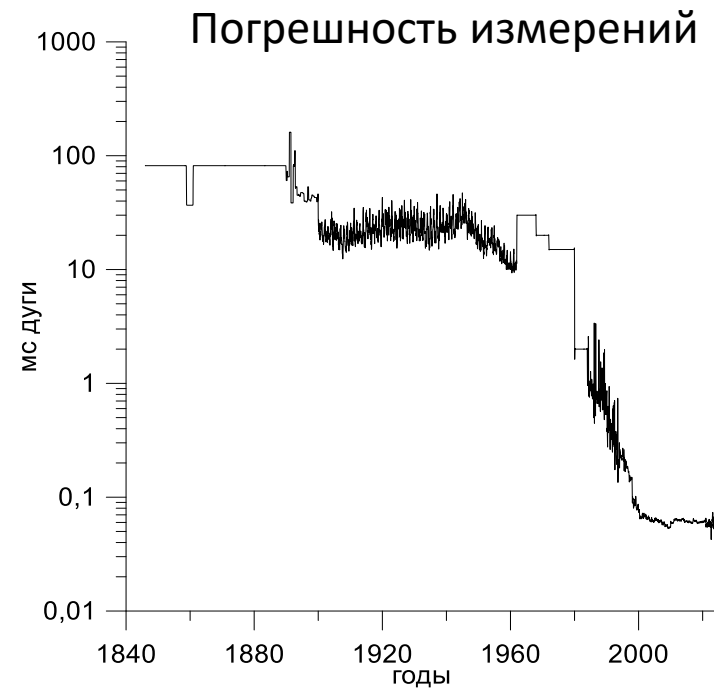
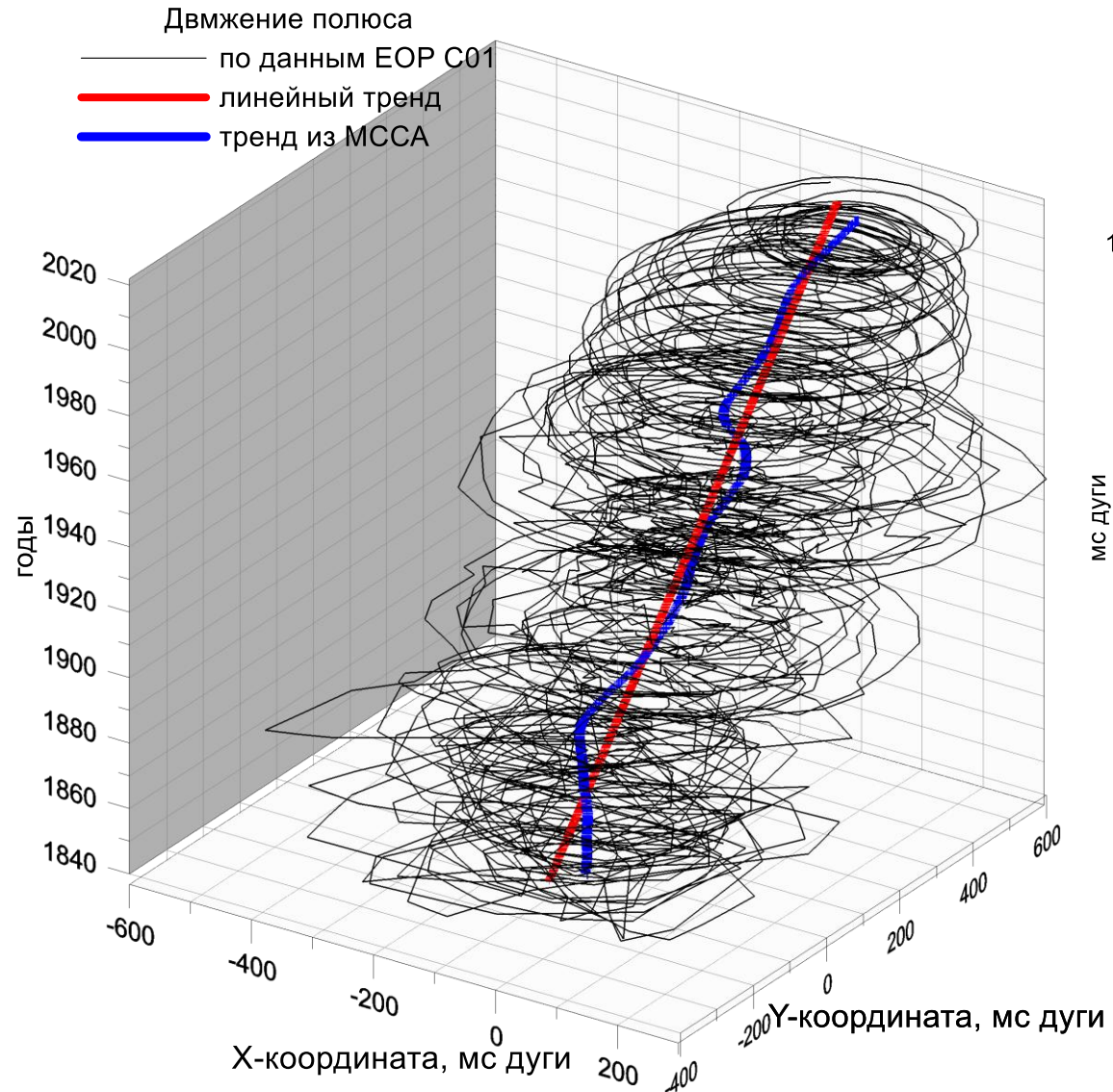


[†]Institute of Geophysics and Planetary Physics, Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, La Jolla, CA, USA. [✉]e-mail: dagnew@ucsd.edu

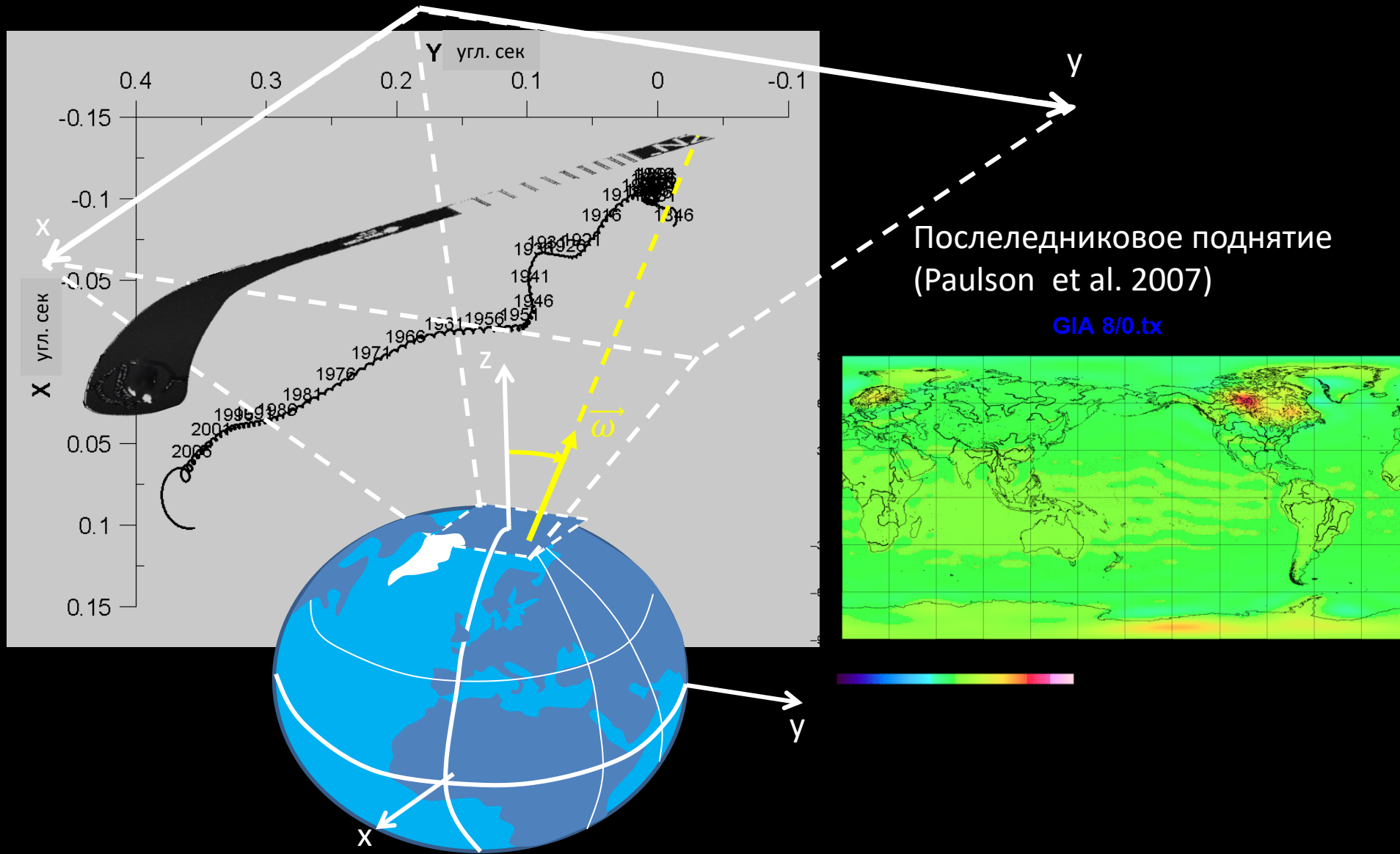
Коэффициент $J_2 = -\sqrt{5}C_{20}$ по SLR и GRACE и его вклад в LOD



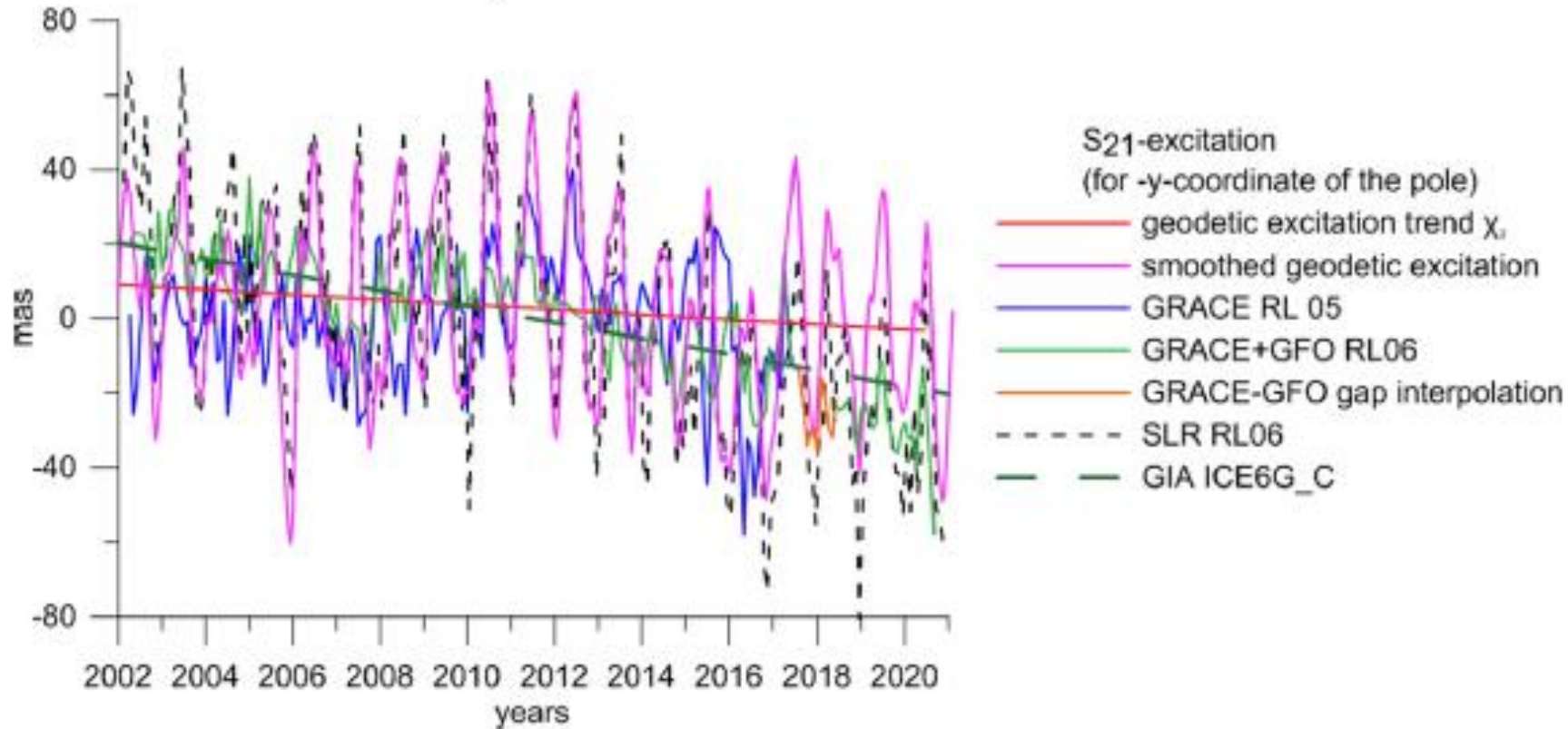
Движение полюса с 1846 по 2025 из бюллетеня EOP C01



Тренд движения полюса и последледниковое поднятие



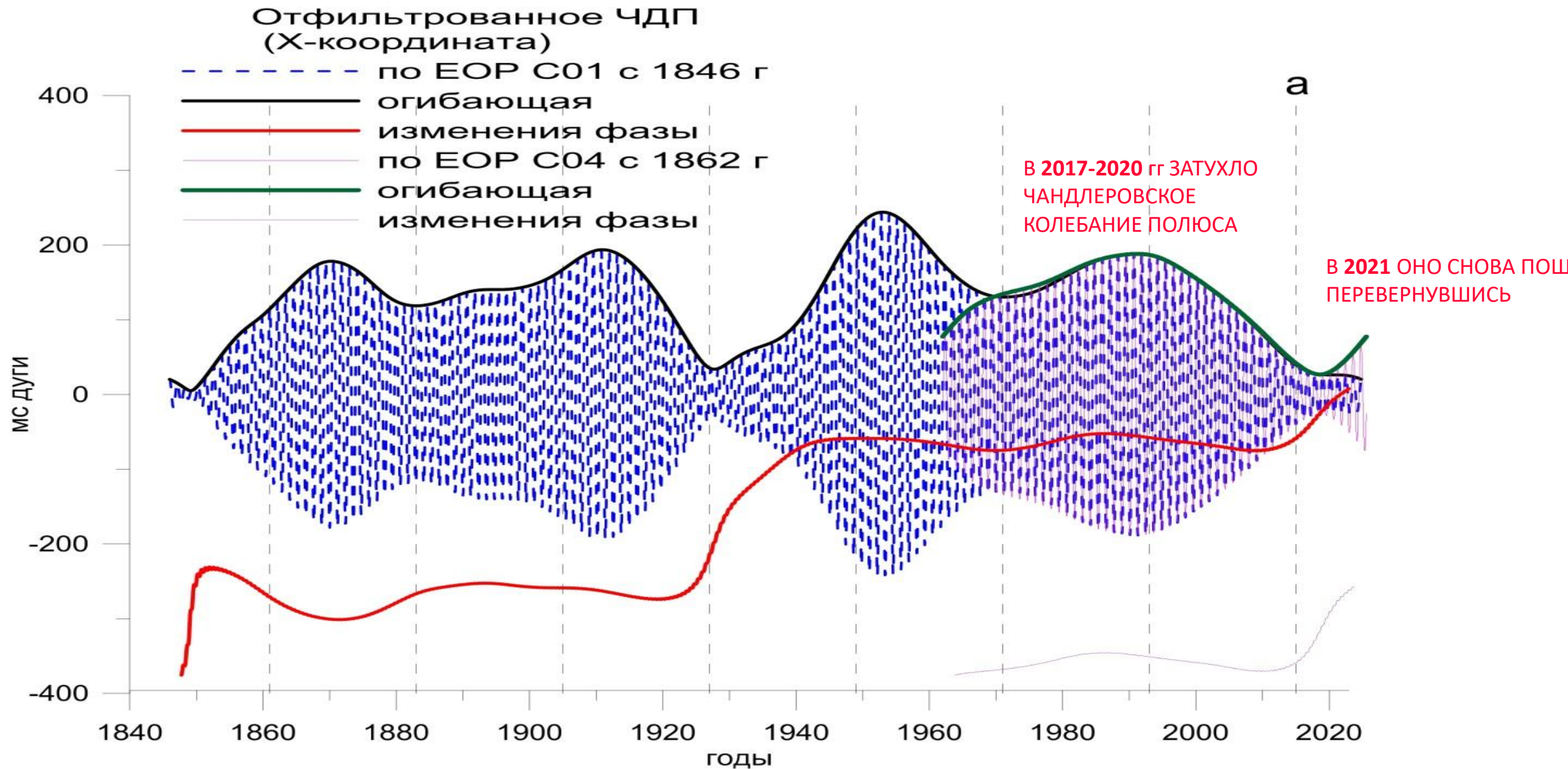
Согласие коэффициентов C_{21} S_{21} по SLR и GRACE с трендами движения полюса



Климатологическое перераспределение масс ответственно за дрейф полюса.

Leonid Zotov, Christian Bizouard, C.K. Shum, Vera Zinovieva, Analysis of the Second Degree Stokes Coefficients of Geopotential and Earth Rotation Trends, AIP proceedings & EGU-2018

Чандлеровское колебание с 1846 по 2025 и его фаза



Динамическая модель вращения Земли

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

$$p = p_1 + ip_2$$

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

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

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

Во временной области

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

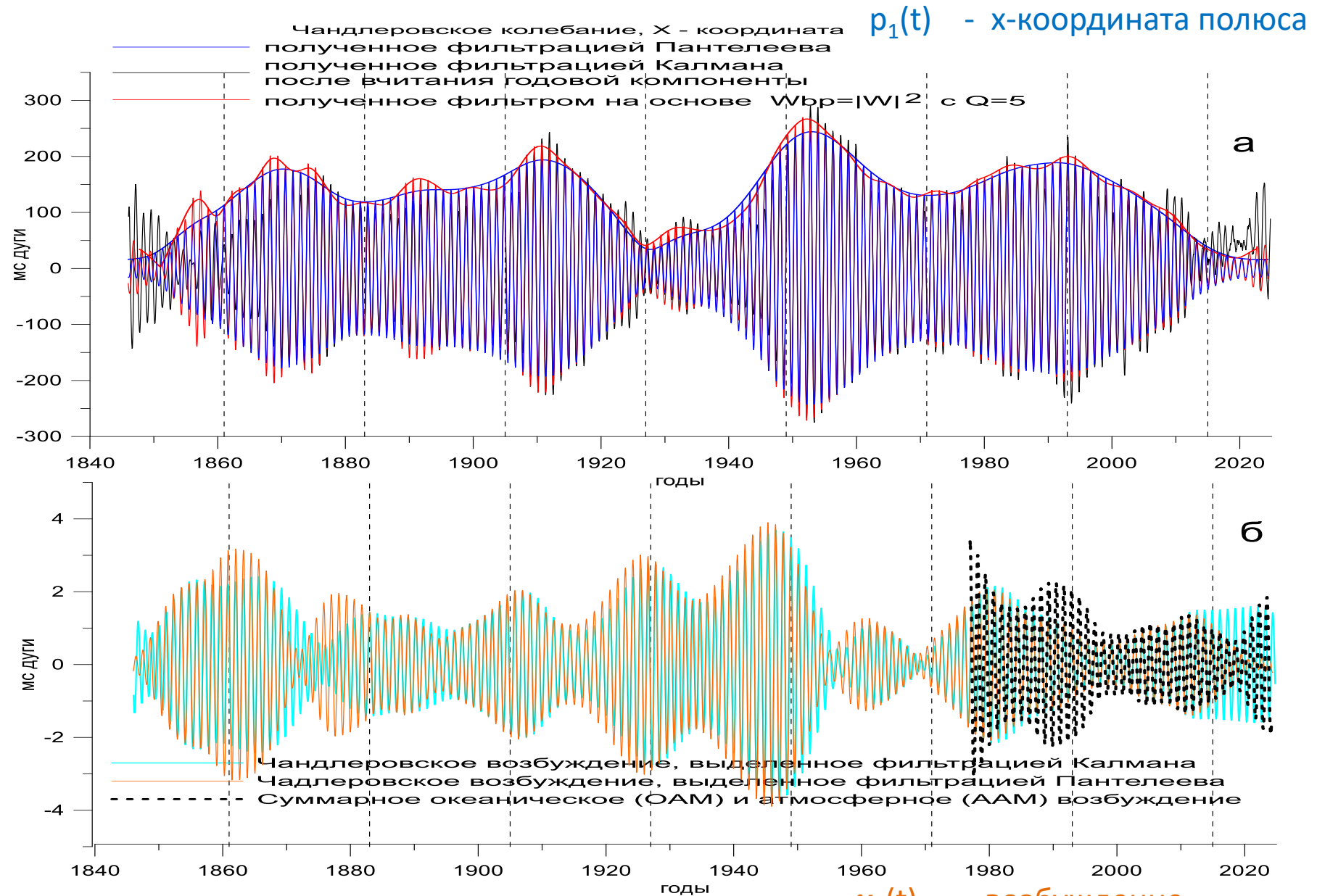
$$\frac{\sigma_c - \omega}{\sigma_c} \hat{p}(\omega) = \hat{\chi}(\omega)$$

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

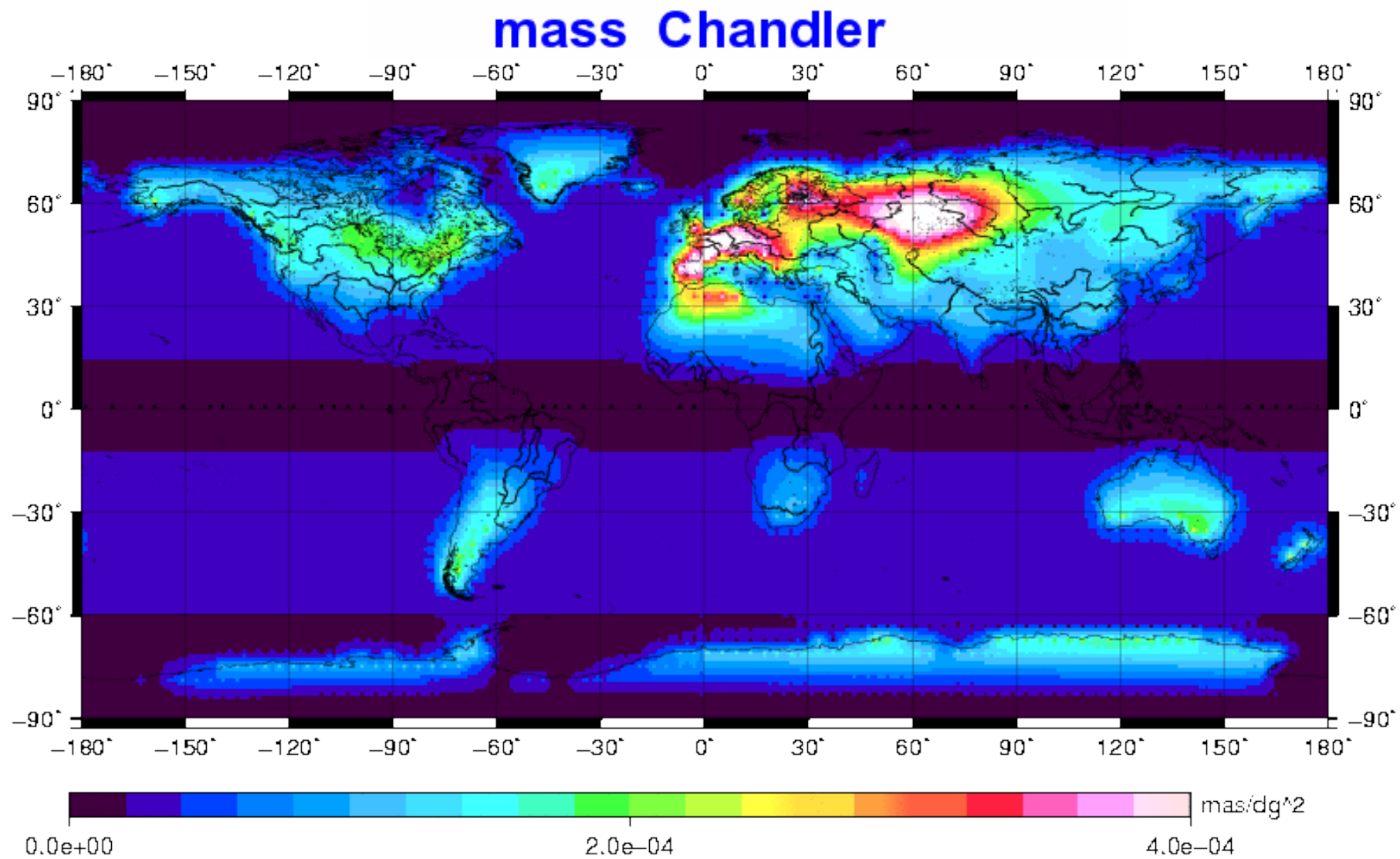
$$W(\omega) = \frac{\sigma_c}{\sigma_c - \omega}$$

В частотной области

Чандлеровское колебание p и его возбуждение χ

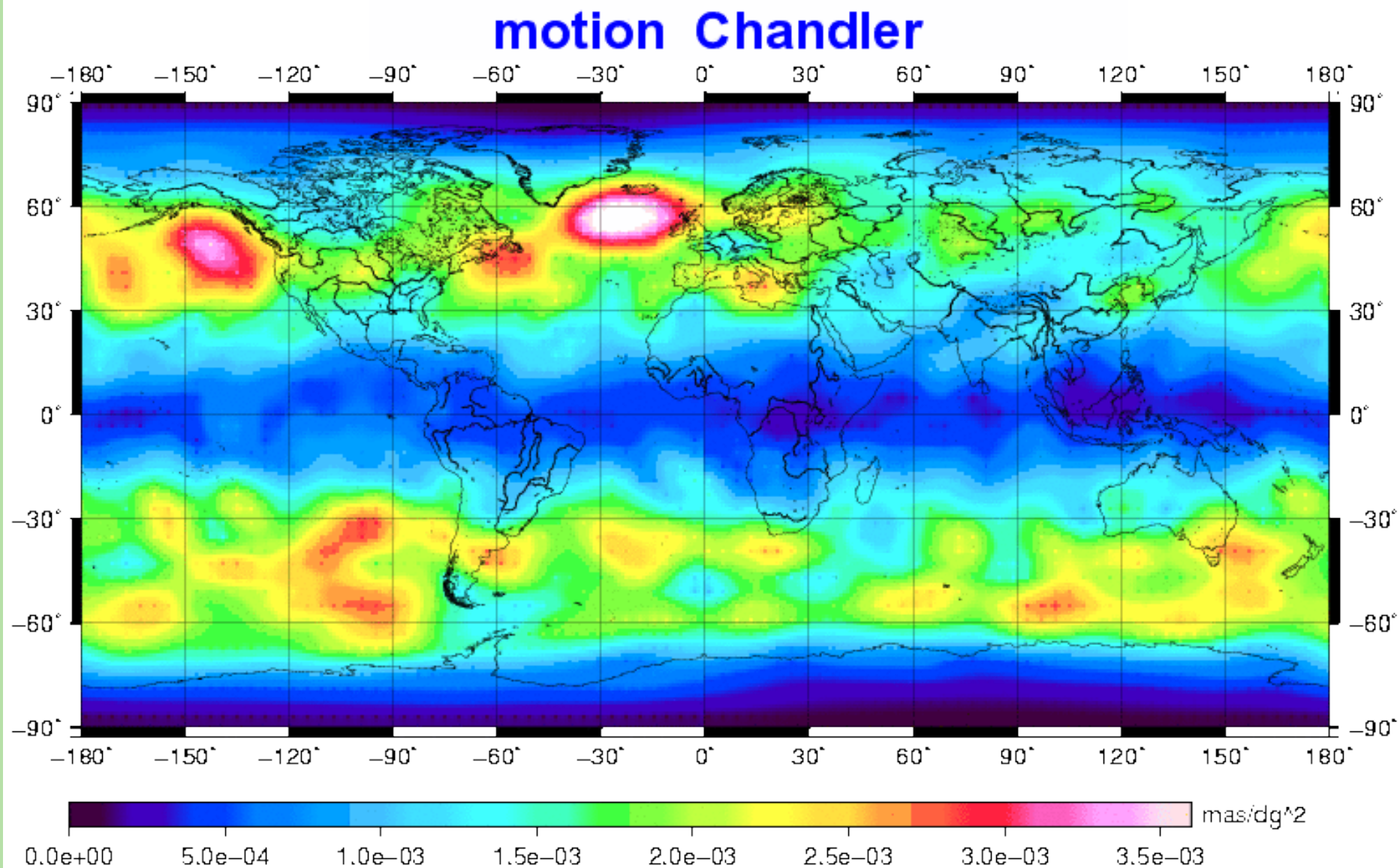


МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В
ЧАНДЛЕРОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЕСМWF ДАВЛЕНИЕ

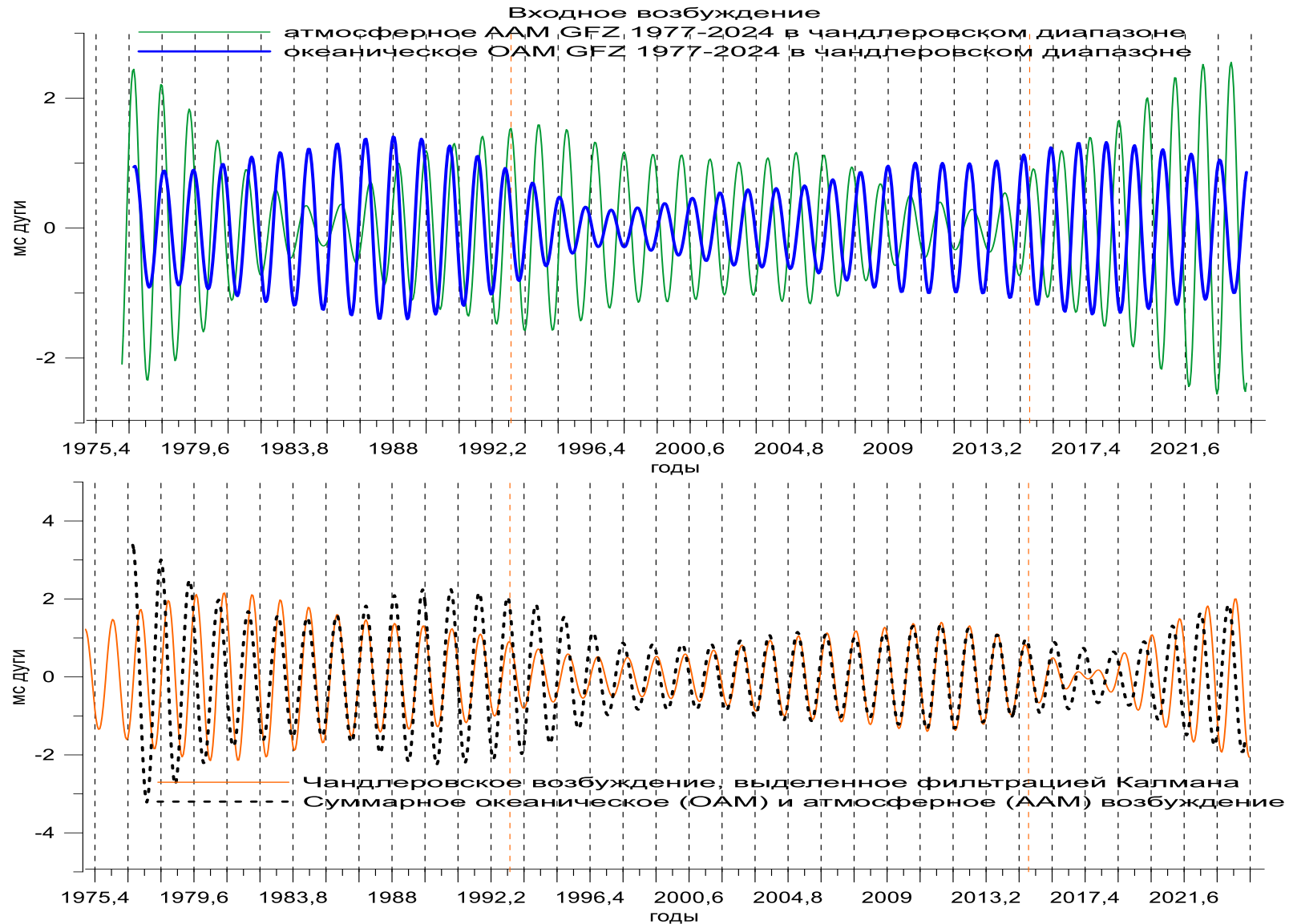


processed by L. Zotov

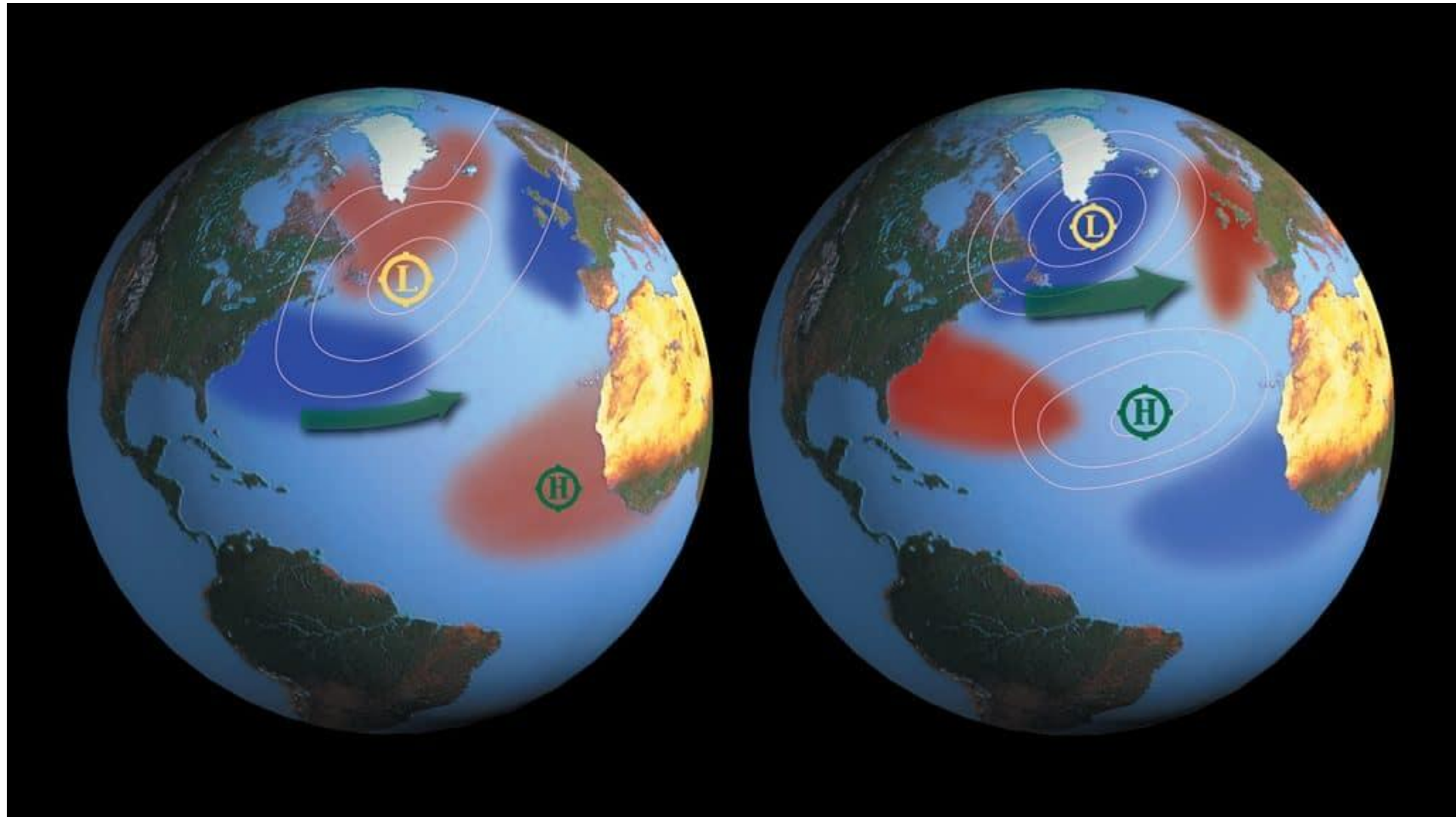
МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В ЧАНДЛЕРОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЕСМWF ВЕТЕР



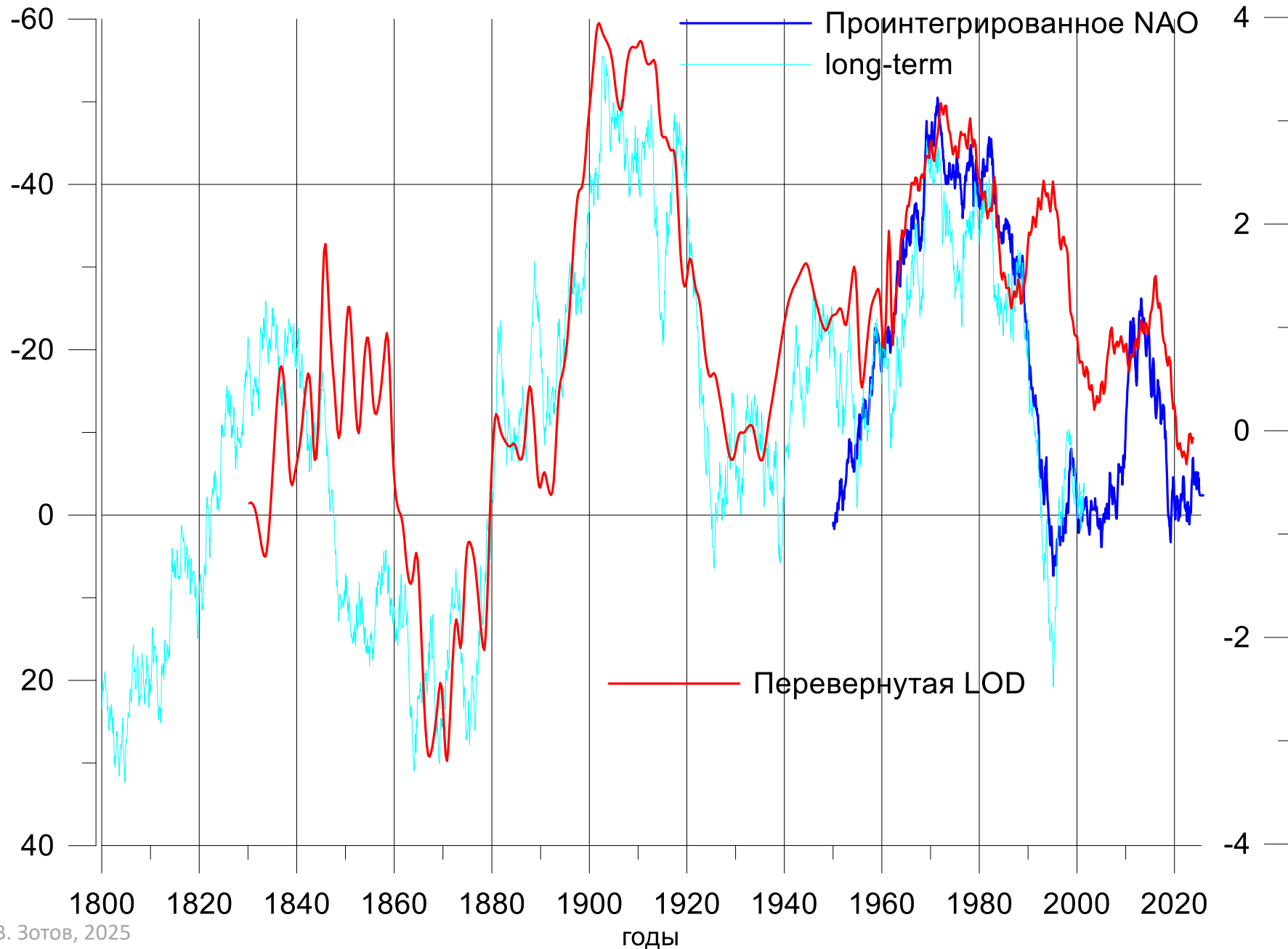
Вклад атмосферы и океана в Чандлеровское возбуждение



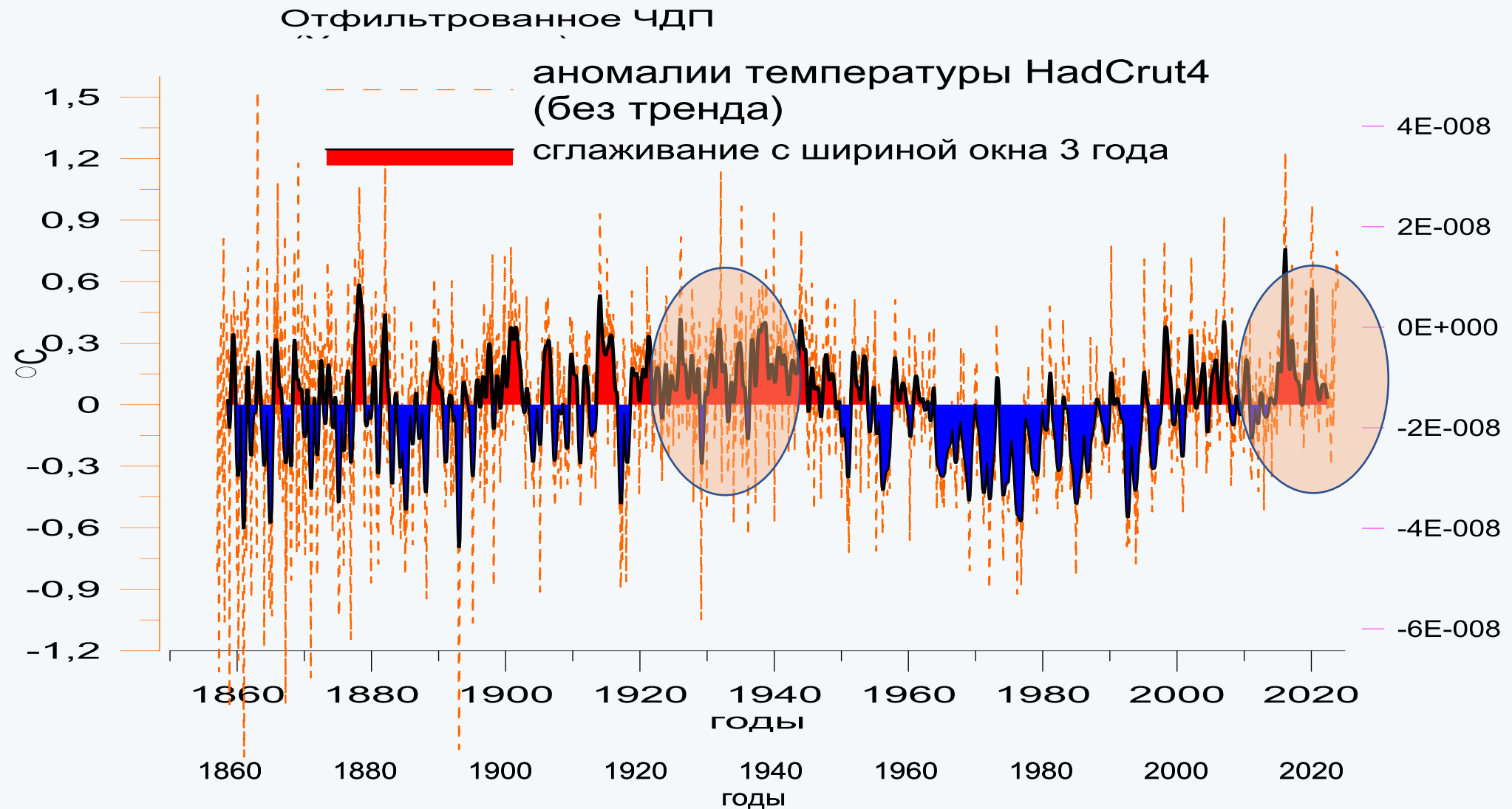
Северо-Атлантическое колебание САК



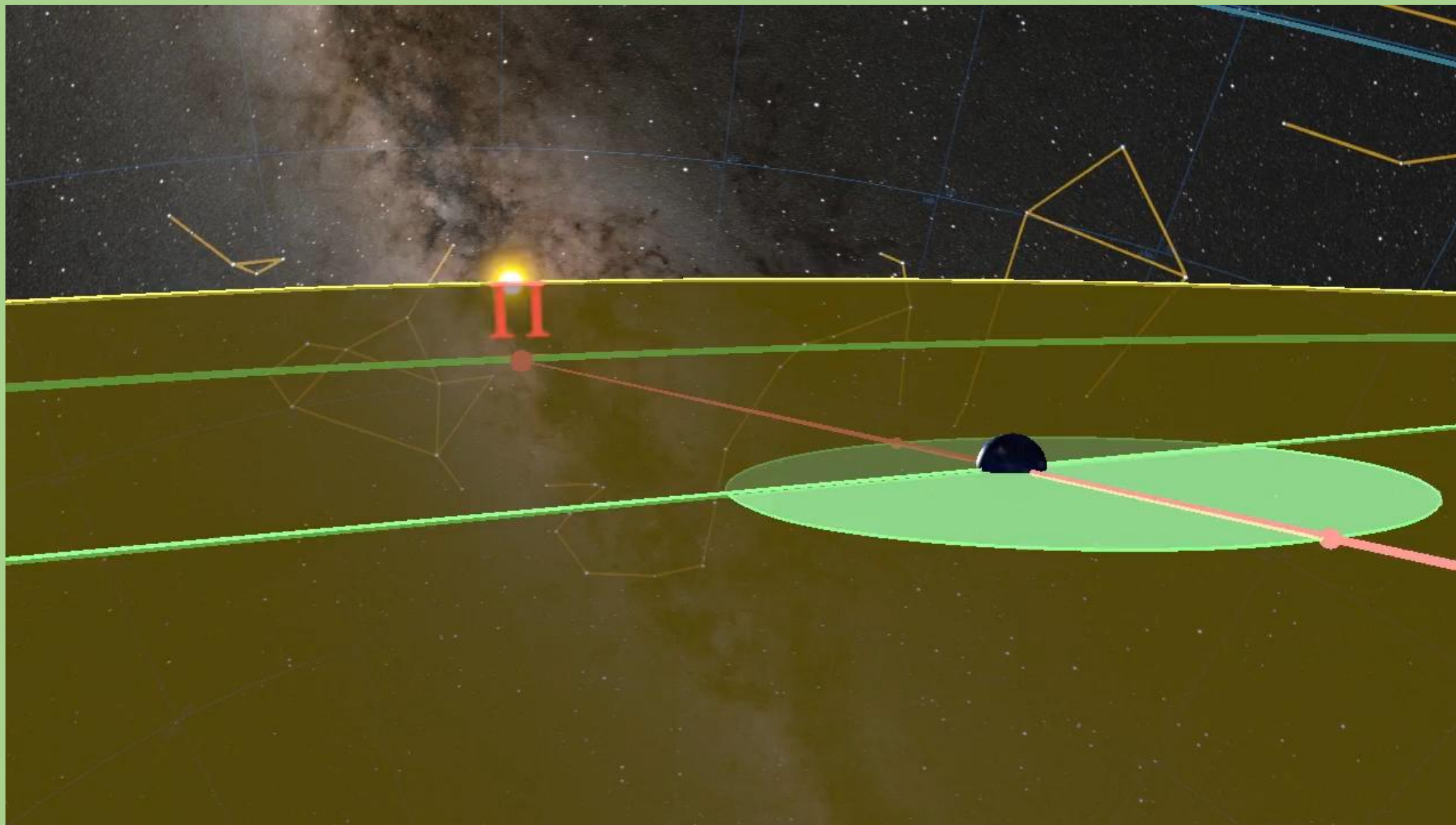
Северо-атлантическое колебание NAO и длительность суток LOD

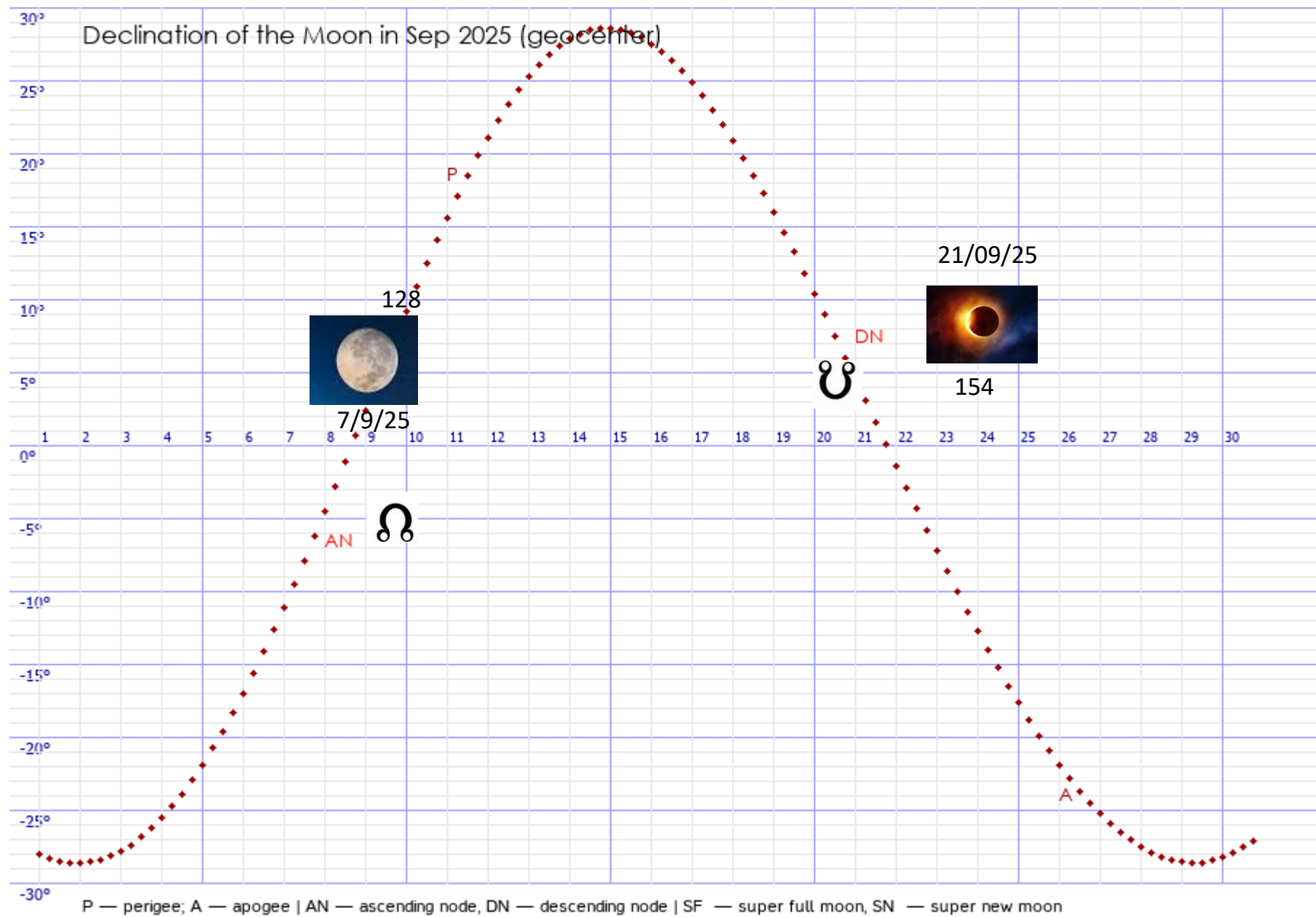


Синхронное поведение Чандлеровского колебания, скорости вращения Земли и многолетнего атлантического колебания

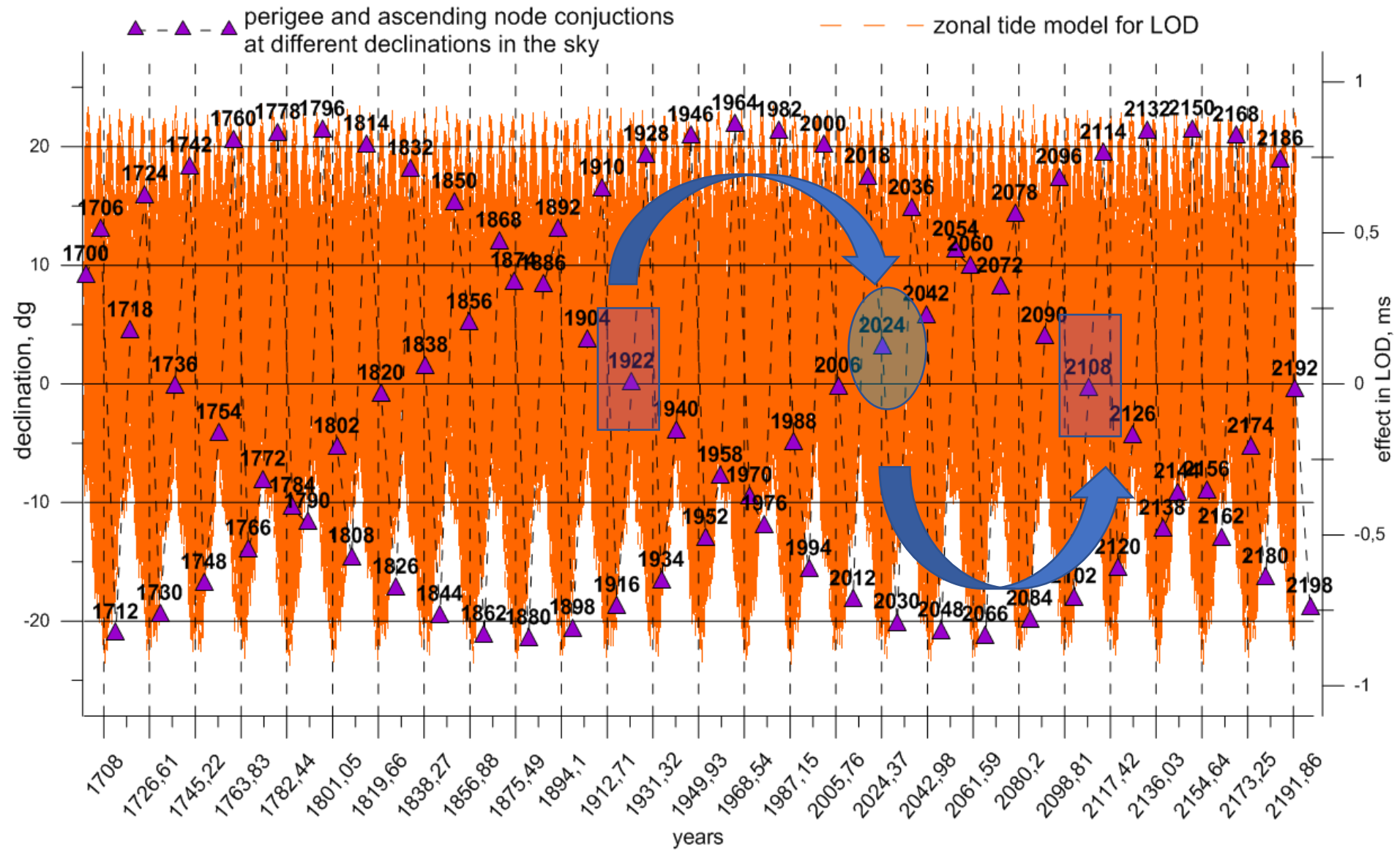


Движение перигея и узлов навстречу друг другу

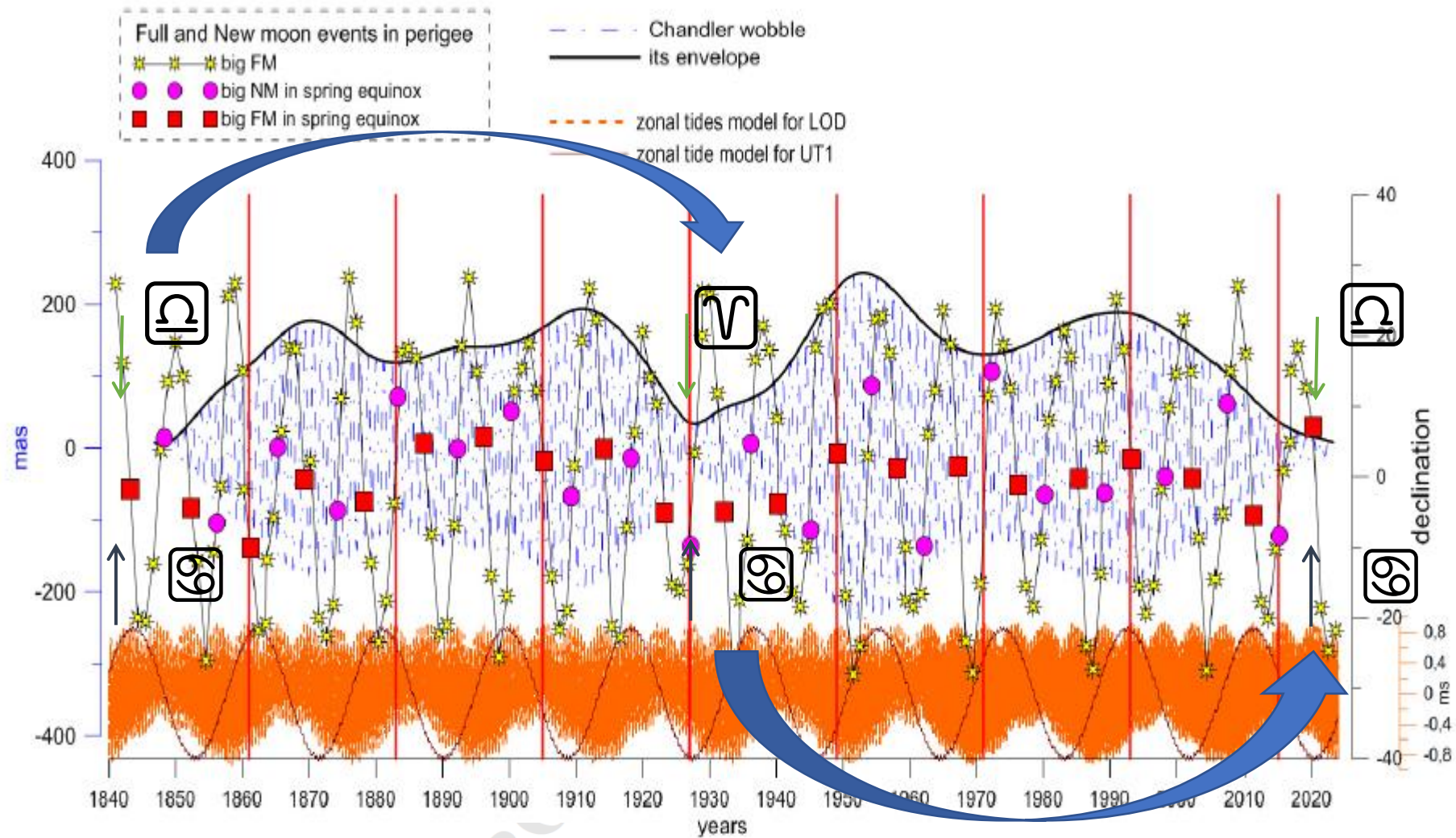




Встречи перигея и узлов каждые 6 лет и их склонения



Возможная причина аномалий Чандлеровского колебания и LOD



23 Problems of Geocosmos

24 Proceedings of the XV Conference and School
25 (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 территориям 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 асимметрий 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, произошедшие с 2022 года

