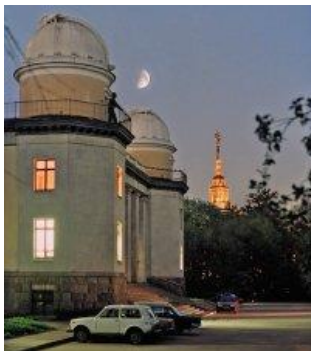


Переворот Чандлеровского колебания полюса

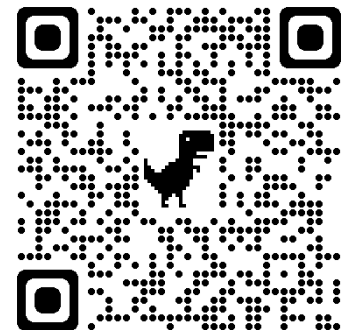
Зотов Леонид Валентинович^{1,2}

¹ГАИШ МГУ ²МИЭМ НИУ ВШЭ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ
ПРОБЛЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

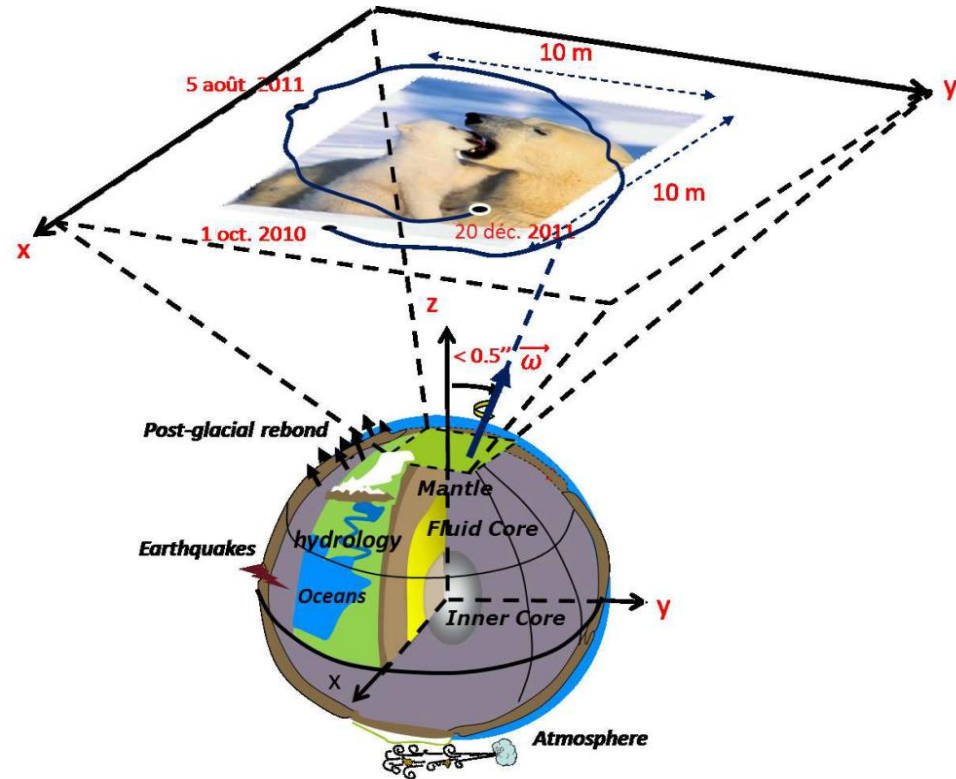
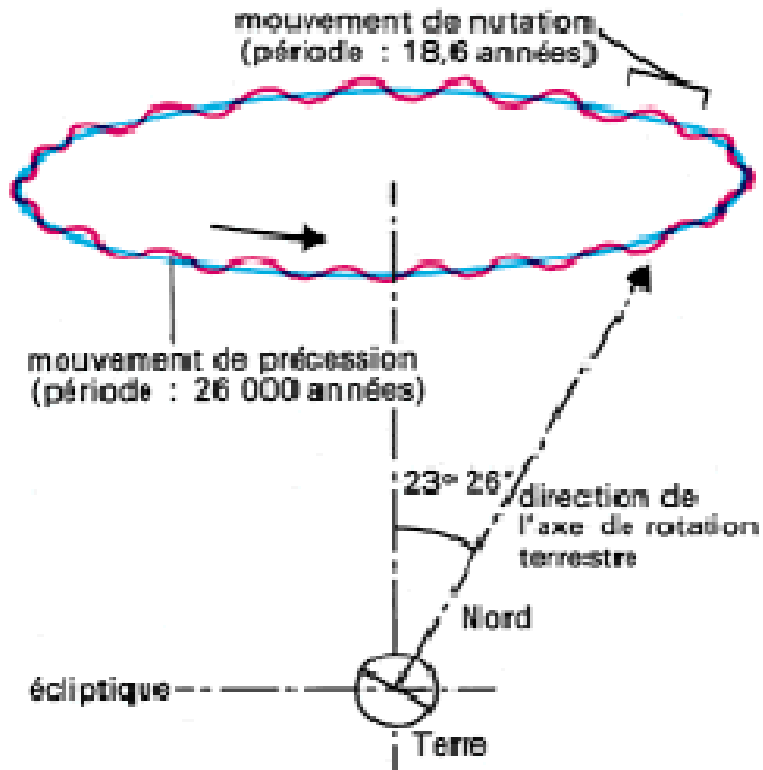
ИПУ РАН
Москва
11 марта 2024 г.



Нутации и движения 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

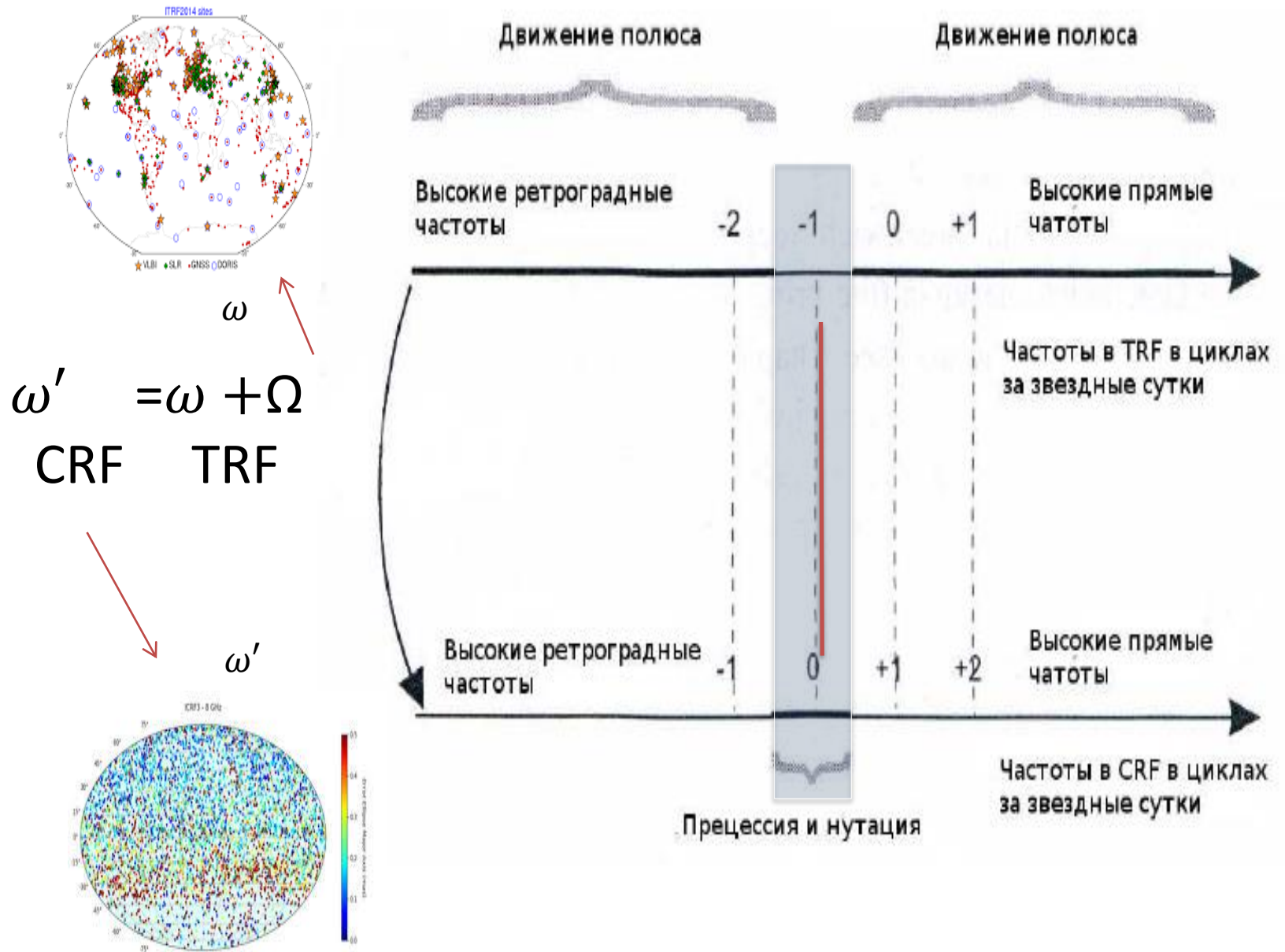
$$\chi_e^{mass} = \frac{1 + k'_2}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{mass}, \quad \chi_e^{motion} = \frac{1}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{motion}.$$

Геодезическое
возбуждение

Геофизическое
возбуждение

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

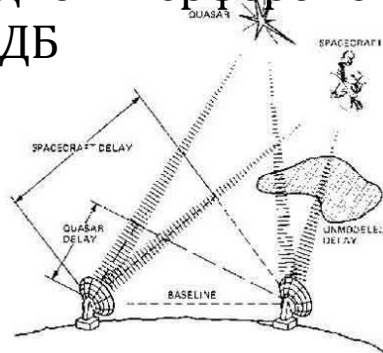
Частоты в земной и небесной системах отсчета



Современные средства наблюдений за вращением Земли



Межконтинентальная
Радиоинтерферометрия
РСДБ



Спутники
LAGEOS
с отражателями

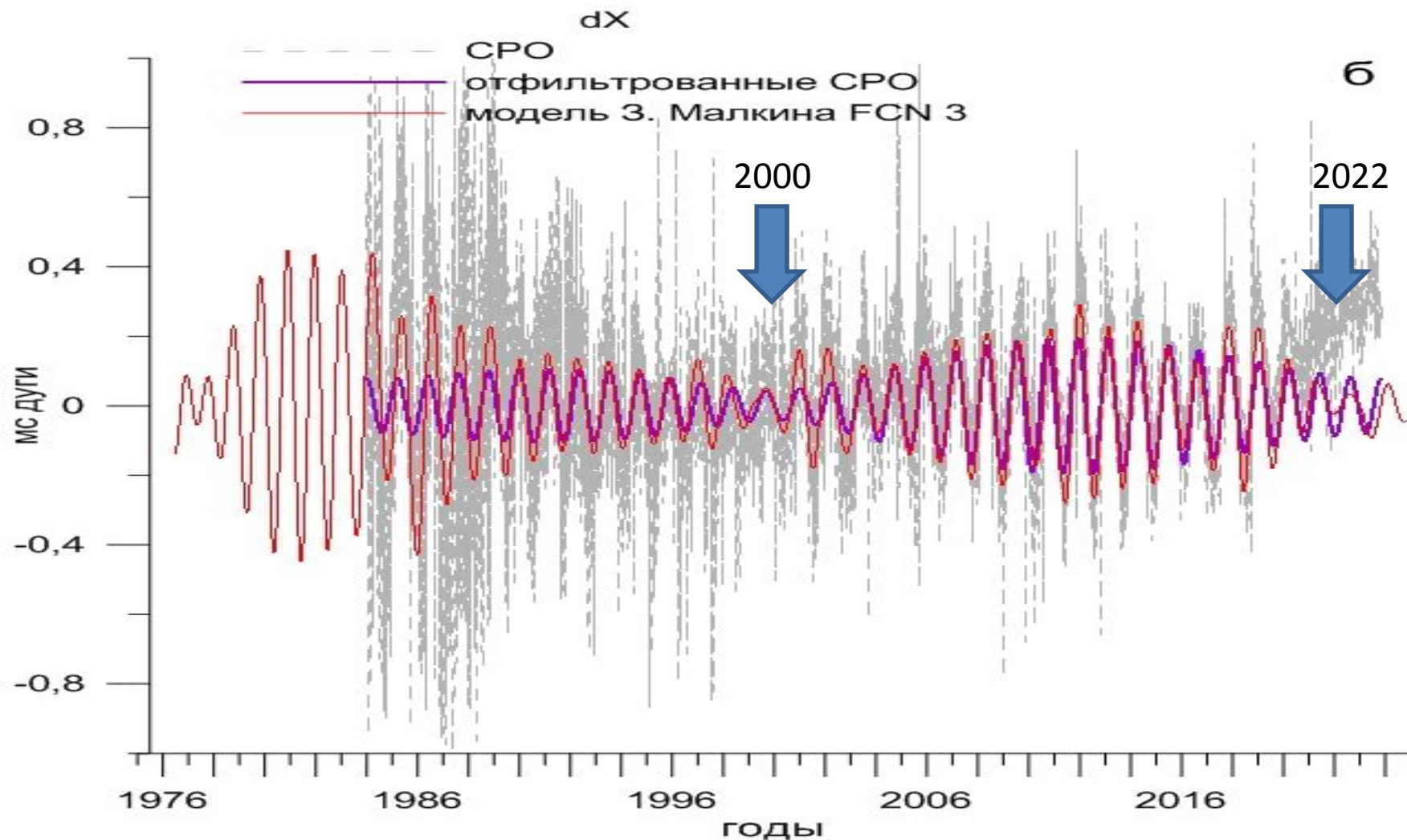


Доплеровская орбитография
DORIS

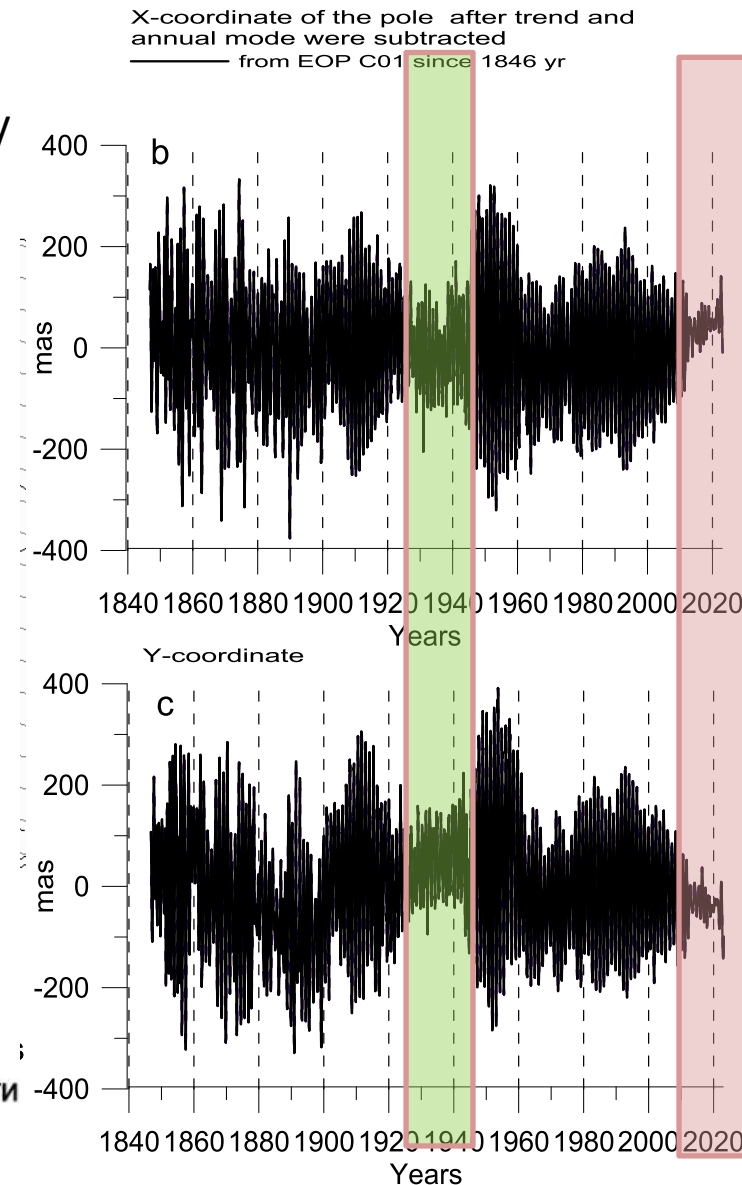
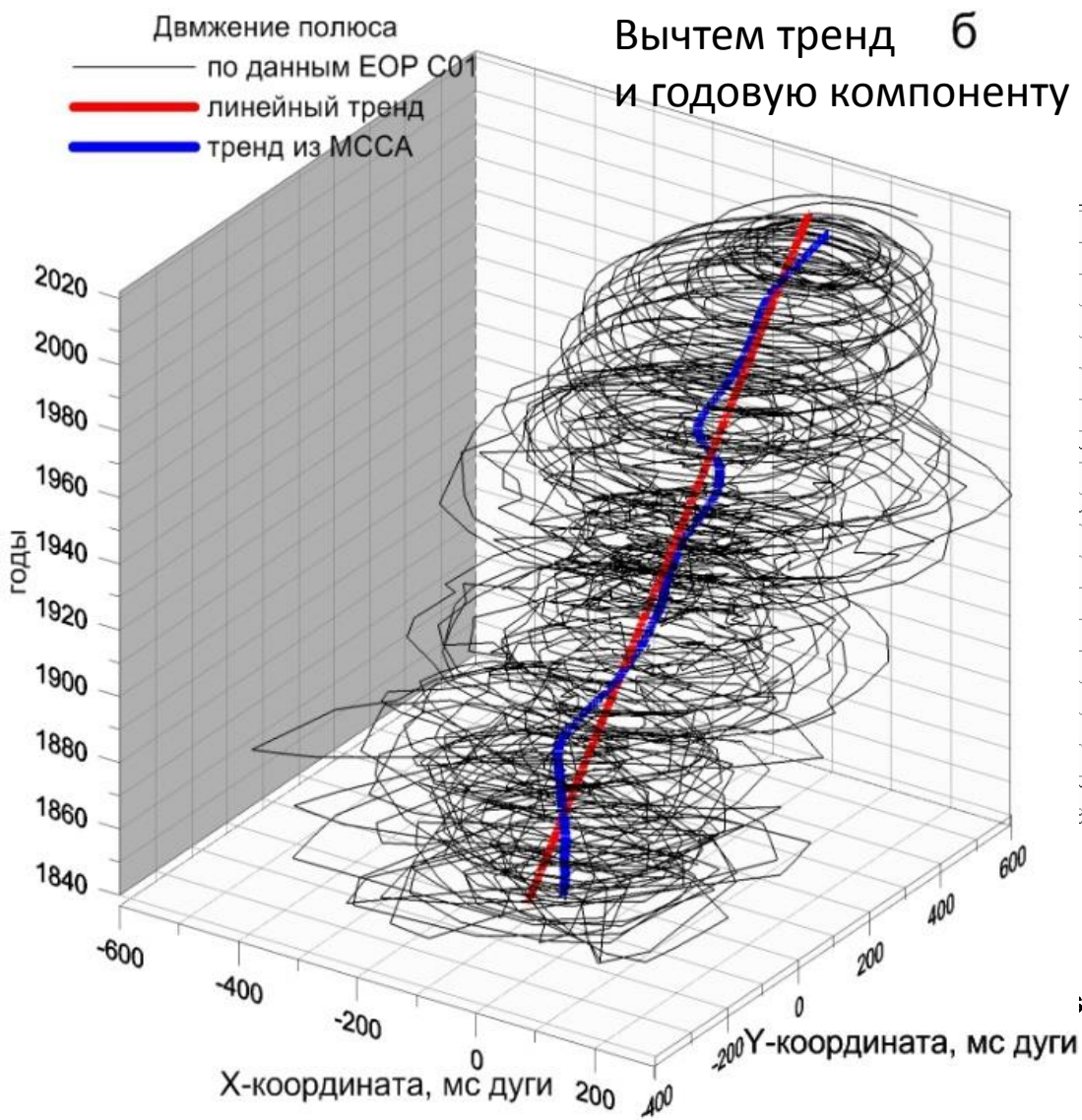


Лазерная локация Луны и спутников

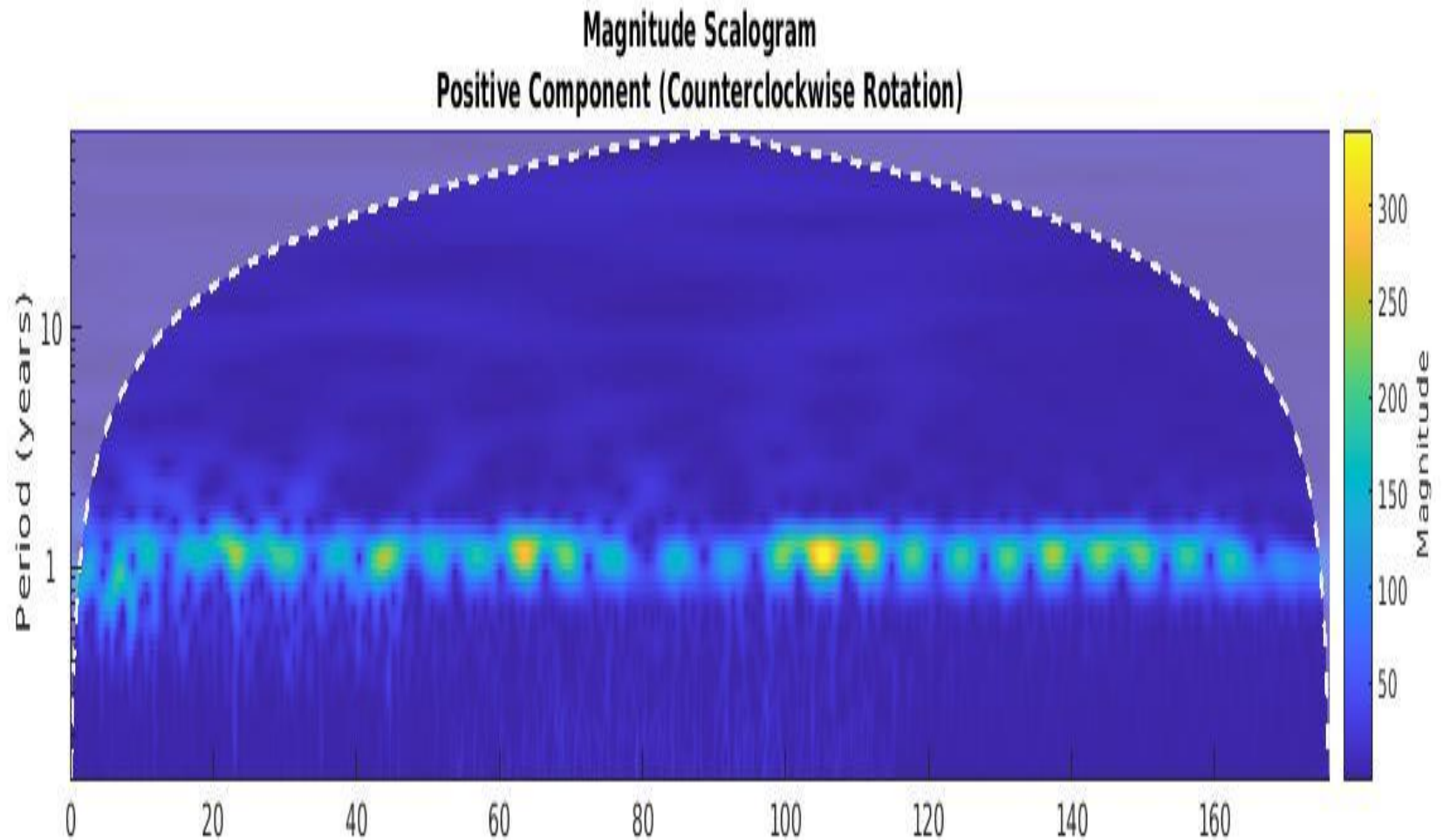
Сигнал нутации ядра FCN



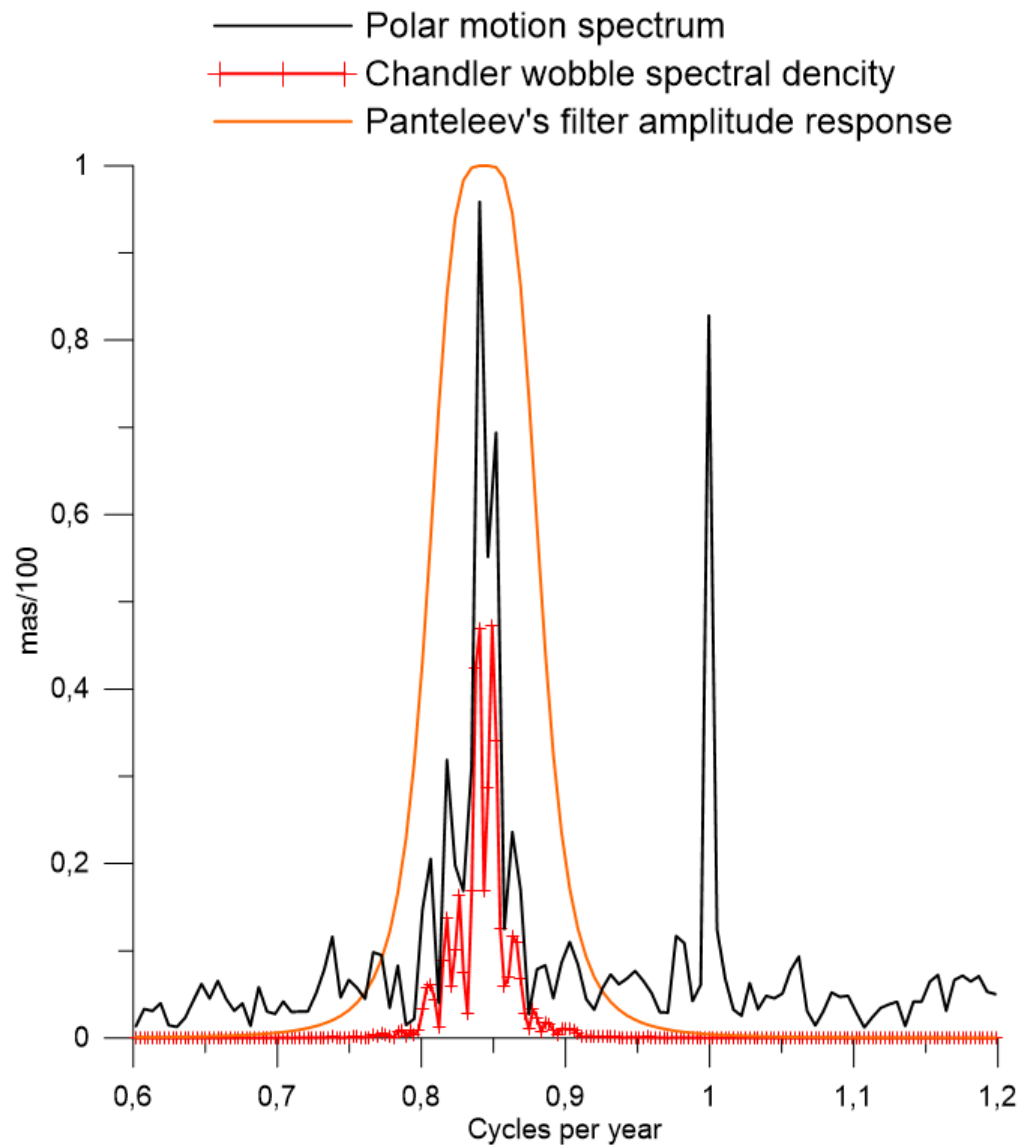
Движение полюса с 1846 по 2024 из бюллетеня EOP C01



Вейвлет-анализ движения полюса



Спектр движения полюса и фильтр Пантелеева

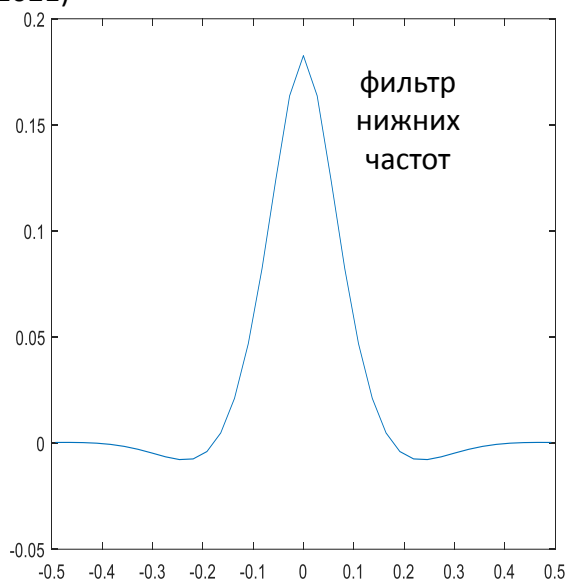




Фильтрация Пантелеева

В.Л. Пантелеев

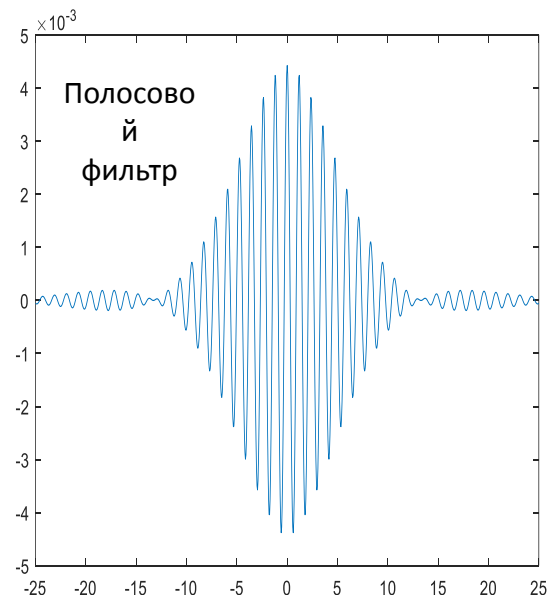
(04.08.1931-06.03.2021)



Фильтрация во временной области
– свертка сигнала с импульсной
характеристикой фильтра

$$h(t) = \frac{\omega_0}{2\sqrt{2}} e^{-\left(\frac{\omega_0|t|}{\sqrt{2}} - i2\pi f_c t\right)} \left(\cos \frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}} + \sin \frac{\omega_0 |t|}{\sqrt{2}} \right),$$

Фильтр Пантелеева
во временной области $\omega_0 = 2\pi f_0$

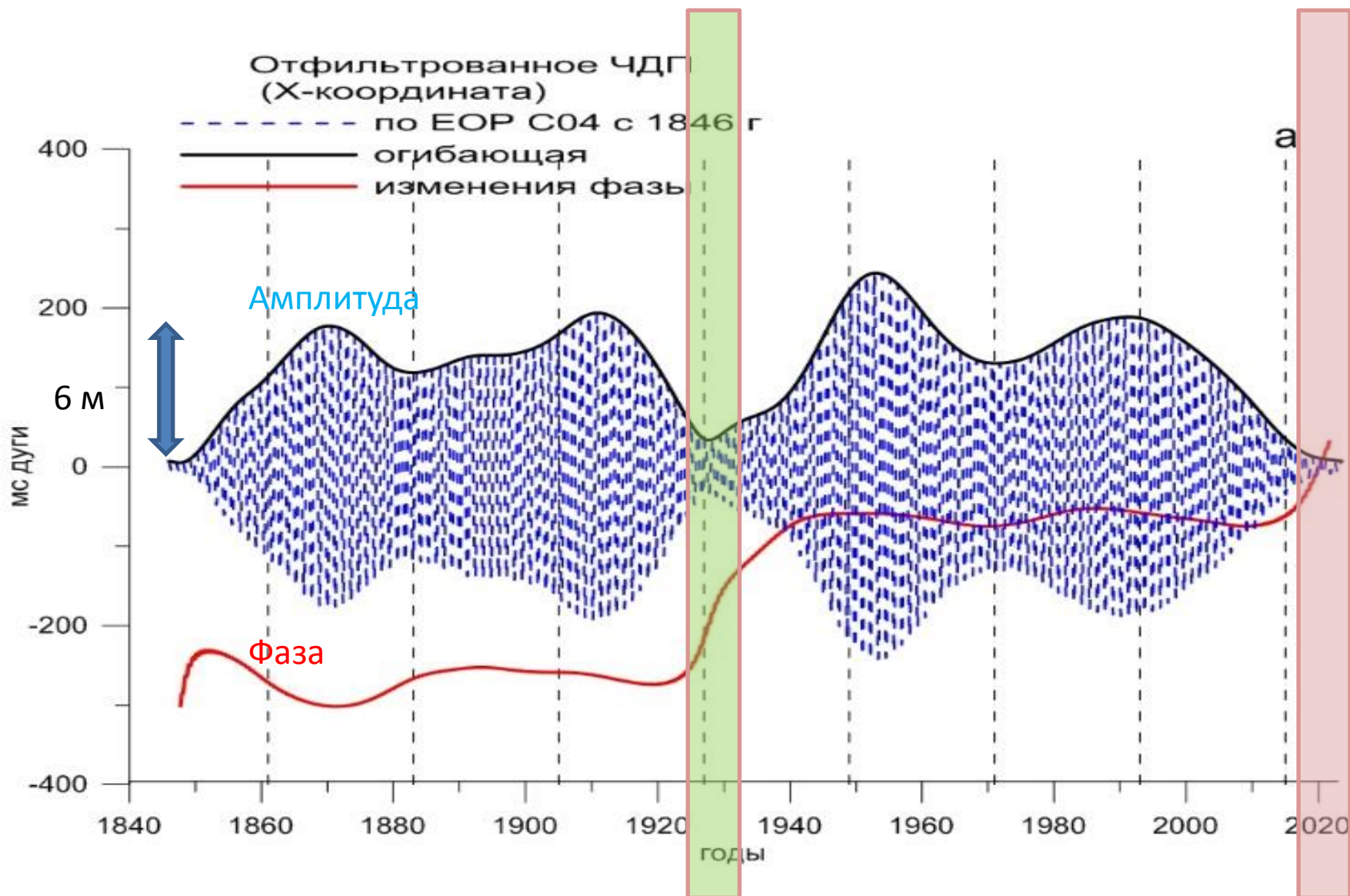


Фильтрация в частотной
области –
умножение спектра на
передаточную функцию

$$L_h(f) = \frac{f_0^4}{(f - f_c)^4 + f_0^4} \cdot \begin{matrix} f_c = 0.166 \text{ лет}^{-1} \\ f_0 = 0.04 \text{ лет}^{-1} \end{matrix}$$

Фильтр Пантелеева в
частотной области

Чандлеровское колебание полюса



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

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

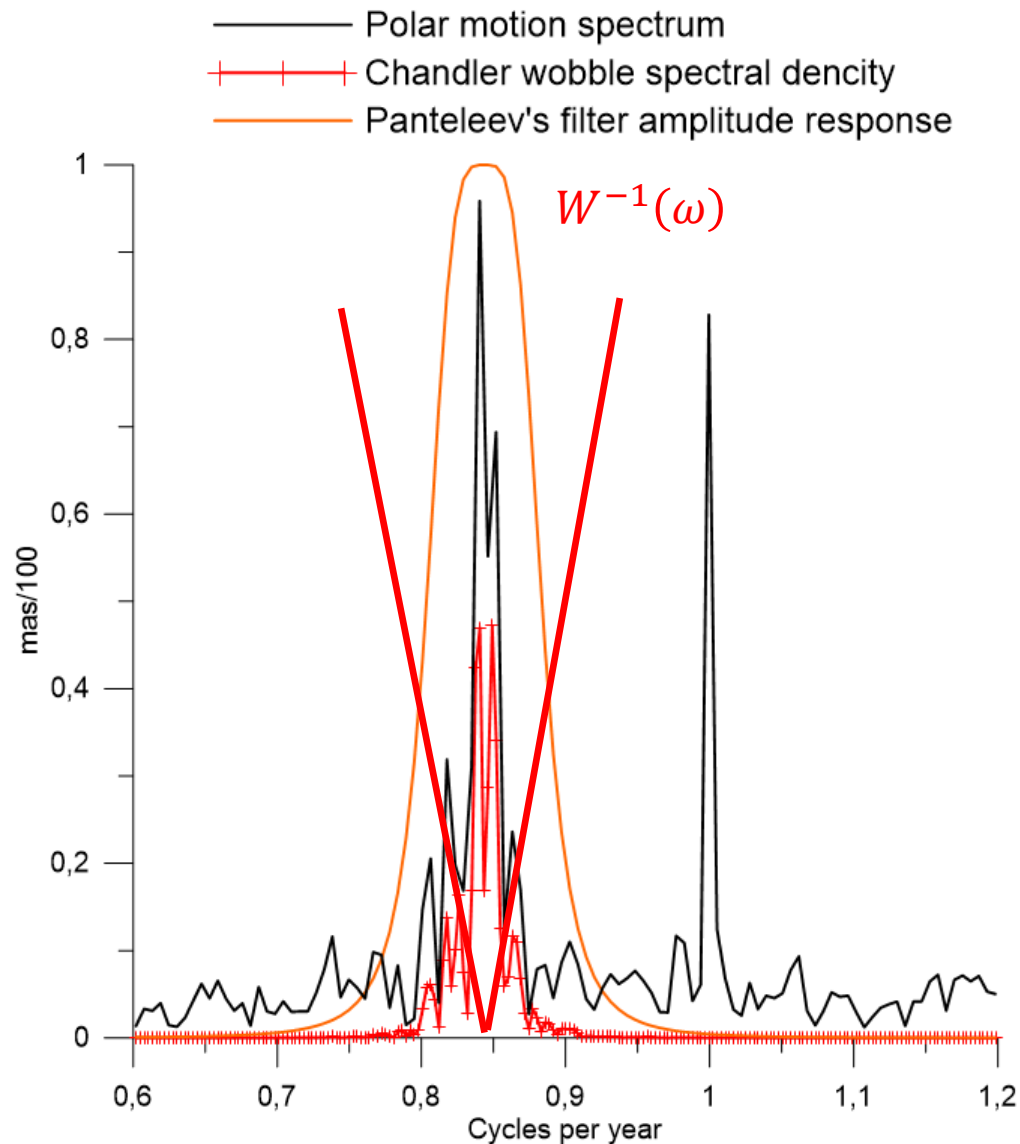
$$\frac{\sigma_c - \omega}{\sigma_c} \hat{p}(\omega) = \hat{\chi}(\omega)$$

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

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

В частотной области

Спектр движений полюса и корректирующий фильтр Пантелеева



Матричное уравнение вращения Земли и корректирующая фильтрация

Уравнение состояний для движений полюса Земли по координатам $p_1 = x$ (Вдоль Гринвичского меридиана) и $p_2 = -y$ (по меридиану в 90° к востоку) получается линеаризацией уравнений Эйлера-Лиувилля [12]

$$D \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta & -\alpha \\ \alpha & -\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta & \alpha \\ -\alpha & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{bmatrix},$$

где α, β – действительная и мнимая составляющие комплексной чандлеровской частоты $\sigma_c = \alpha + i\beta = 2\pi f_c + i \frac{\pi f_c}{Q}$, Q – добротность (примем ≈ 100), $f_c = 1/433$ сут $^{-1}$ – действительная чандлеровская частота, $D = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, χ_1, χ_2 – компоненты входного возбуждения, i – мнимая единица.

$$x = [p_1, p_2, \chi_1, \chi_2]^T$$

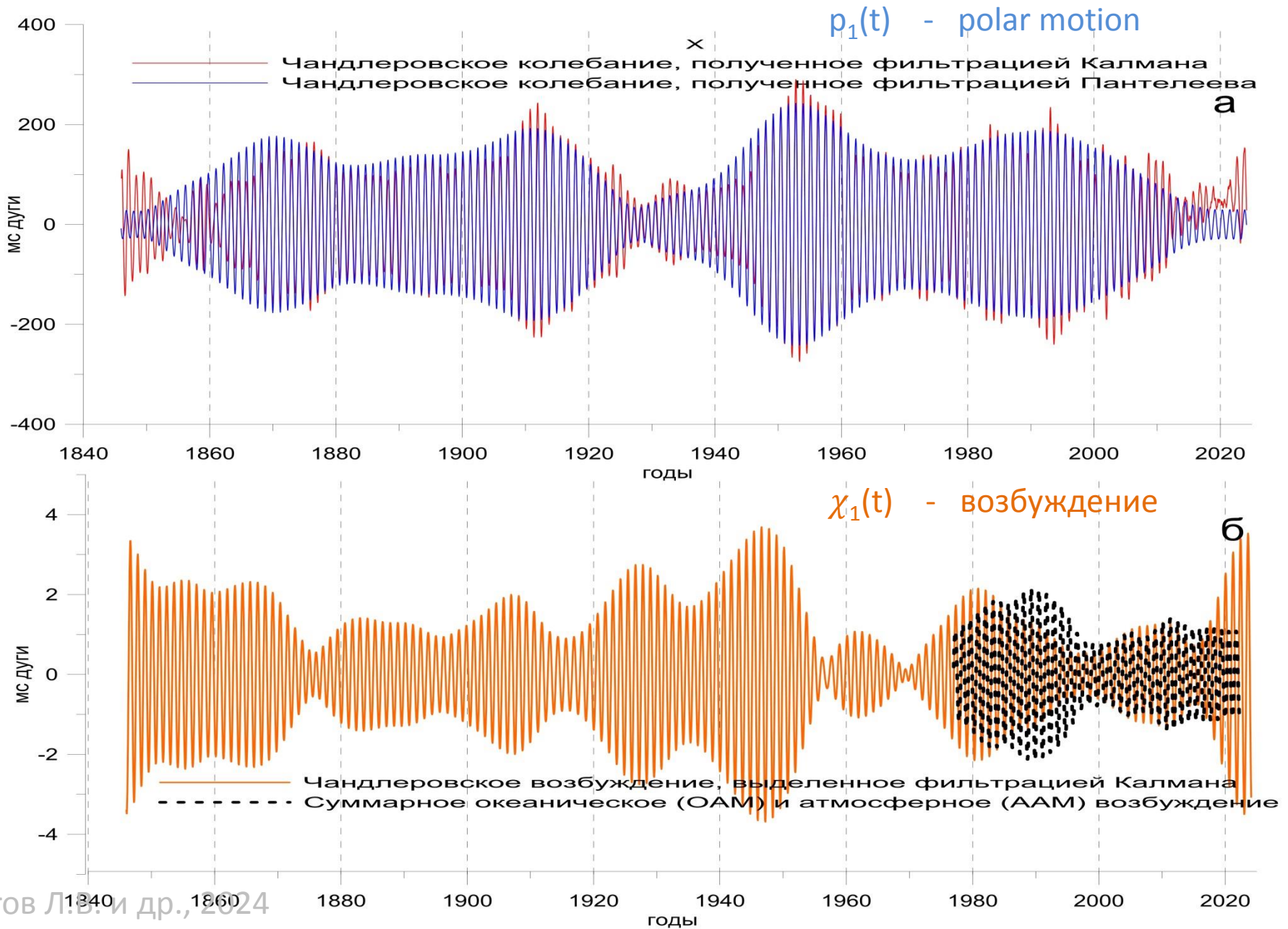
Проблема определения геодезического возбуждения

$$\begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & \alpha \\ -\alpha & \beta \end{bmatrix}^{-1} \left(DI - \begin{bmatrix} -\beta & -\alpha \\ \alpha & -\beta \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = W^{-1}(D) \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}$$

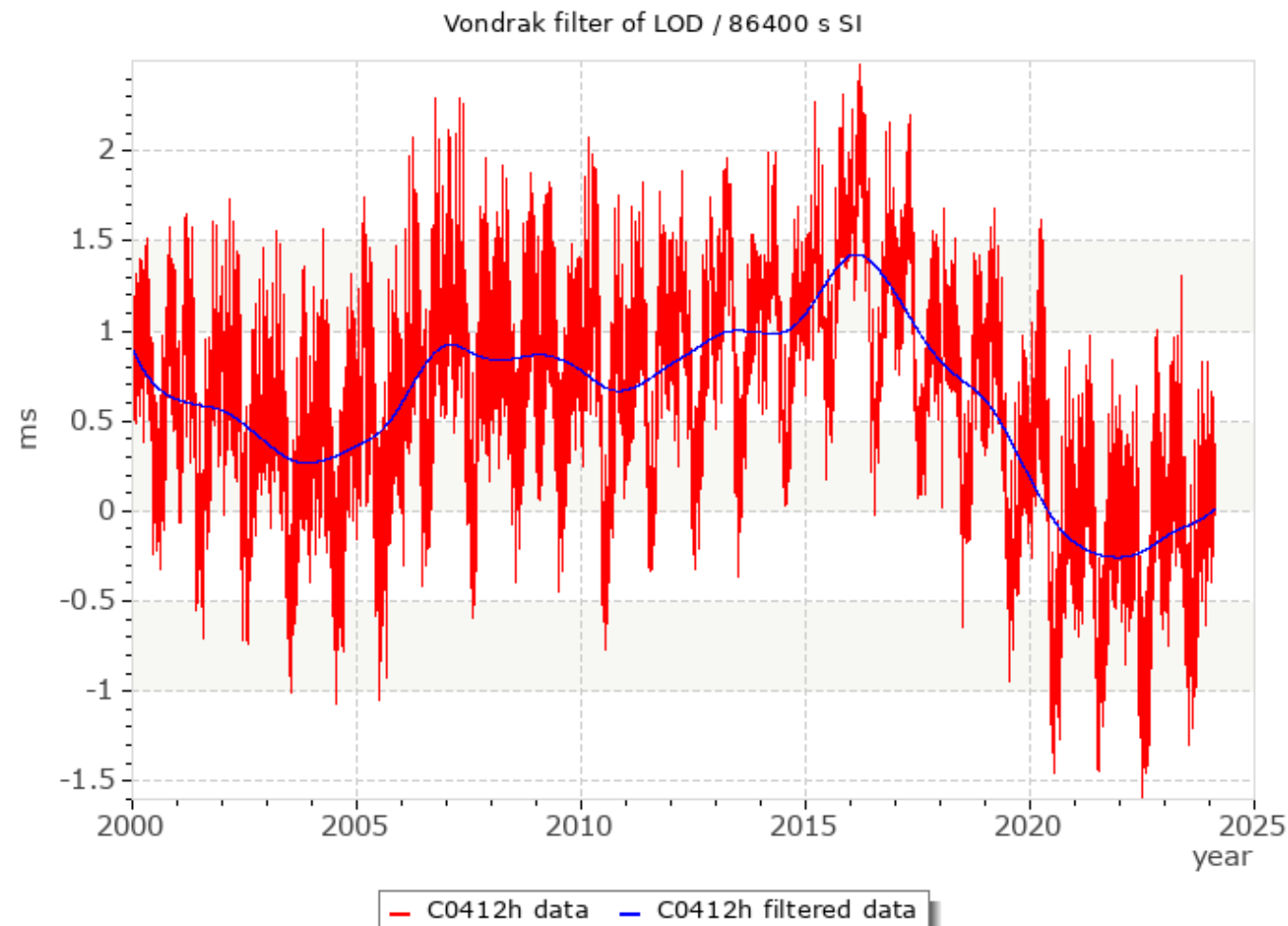
может быть скорректирована или регуляризована

$$W_{\text{corr}}(f)W^{-1}(f) = \frac{W^*(f)}{W^*(f)W(f) + \alpha I},$$

Чандлеровское колебание p и его возбуждение χ

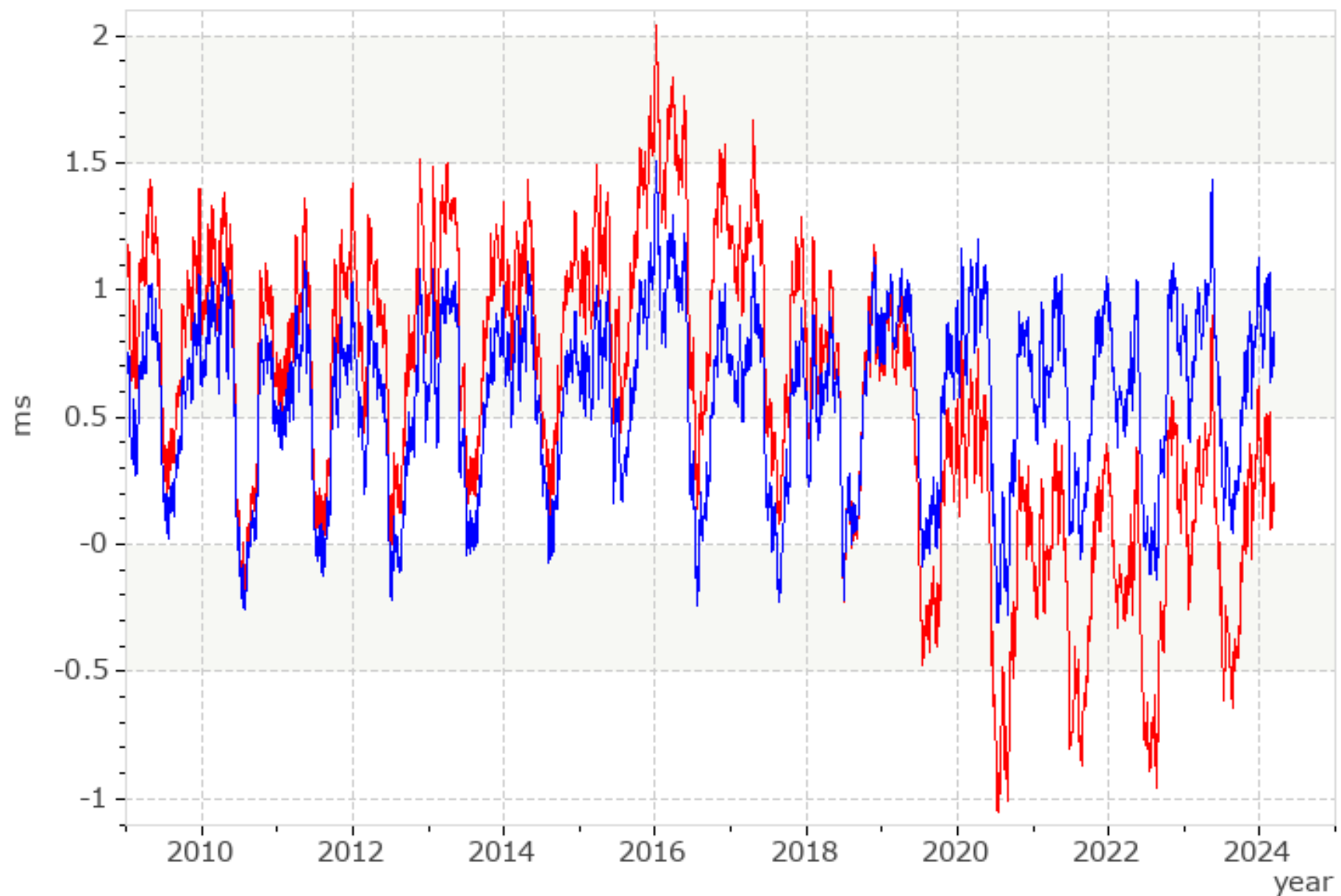


- EOP TIME SERIES ▾
- FTP products
- Reference C04 series
Each day since 1962
- Reference C01 series
Each 0.05 year from 1846
- EOP series & analysis
- EOP series & comparison
- Bulletins B, C, D
- Last days for EOP
- Rotation matrix/vector
- WEB Service
- EOP series: synoptic
- THEORY AND MODELLING ▾
- GEOPHYSICAL EXCITATION ▾
- LINKS ▾



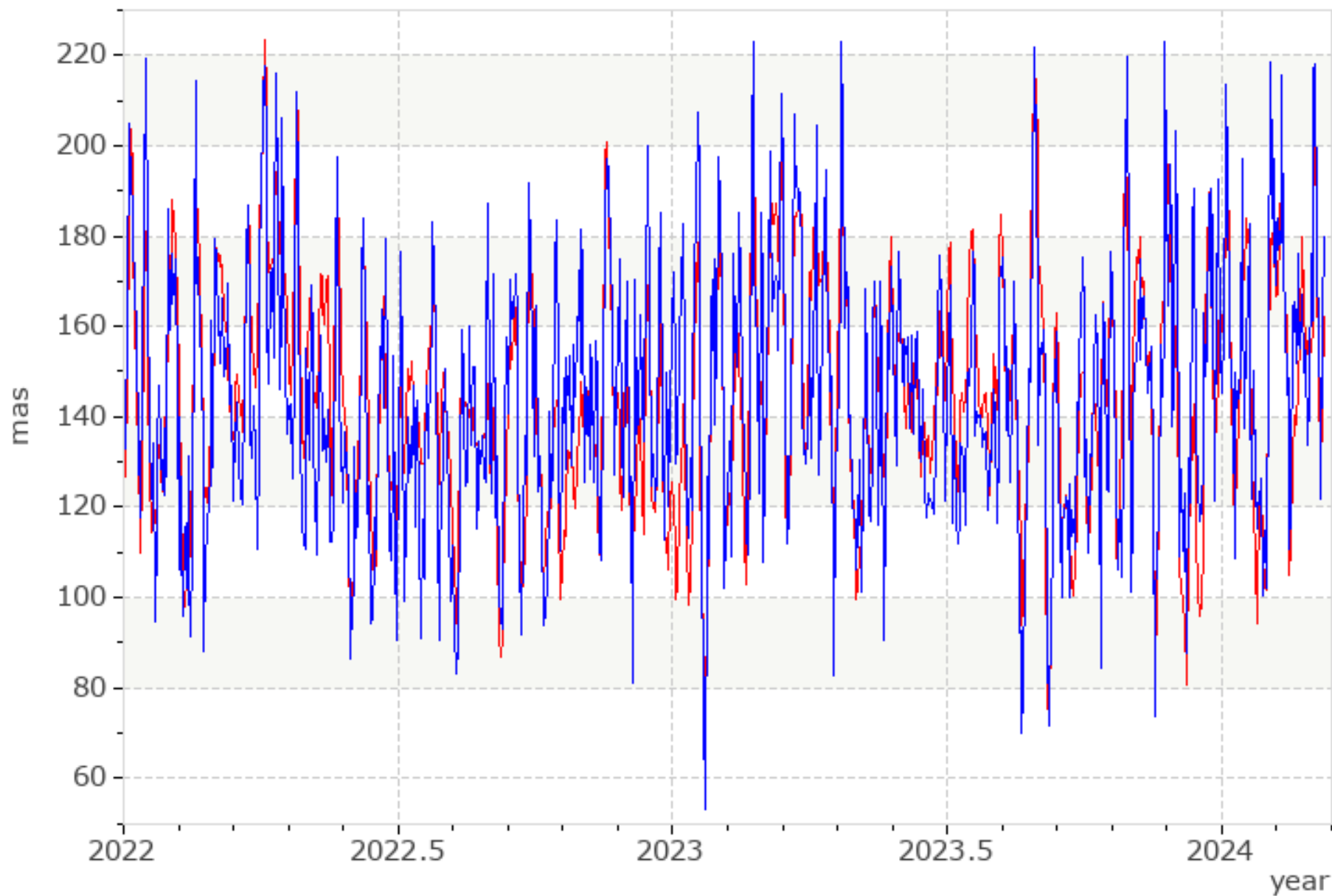
Last leap second: **31 December 2016** TAI - UTC: **37 s** Next leap second: **Not scheduled**

Length of day change



— G (std= 0.58) — [Ama+mo Oma+mo- -0.55 ms] (std= 0.34) Cor.=0.664 Expvar =-0.291

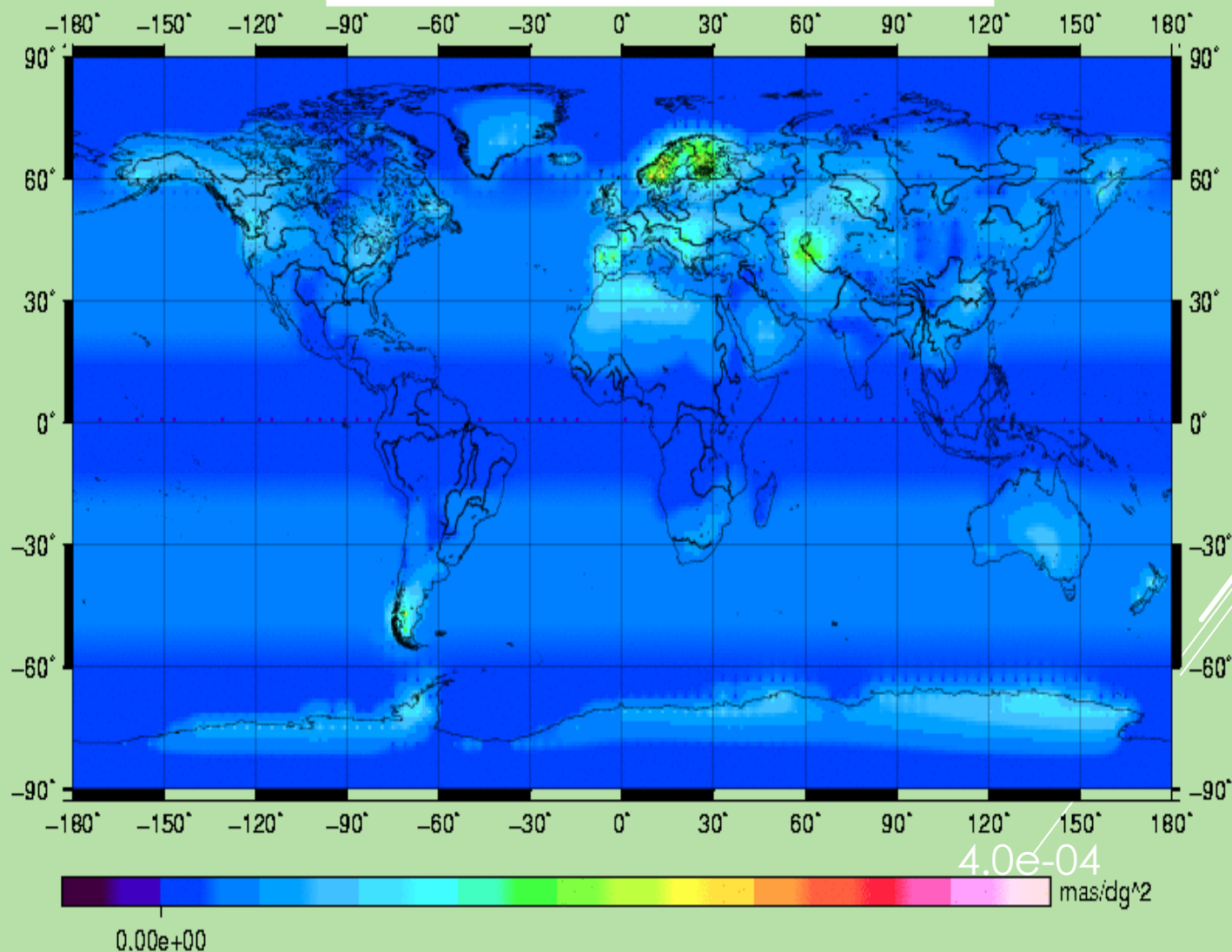
Equatorial x component



— G (std= 26.25) — [Ama+mo Oma+mo--145.44 mas] (std= 28.55) Cor.=0.806 Expvar =0.397

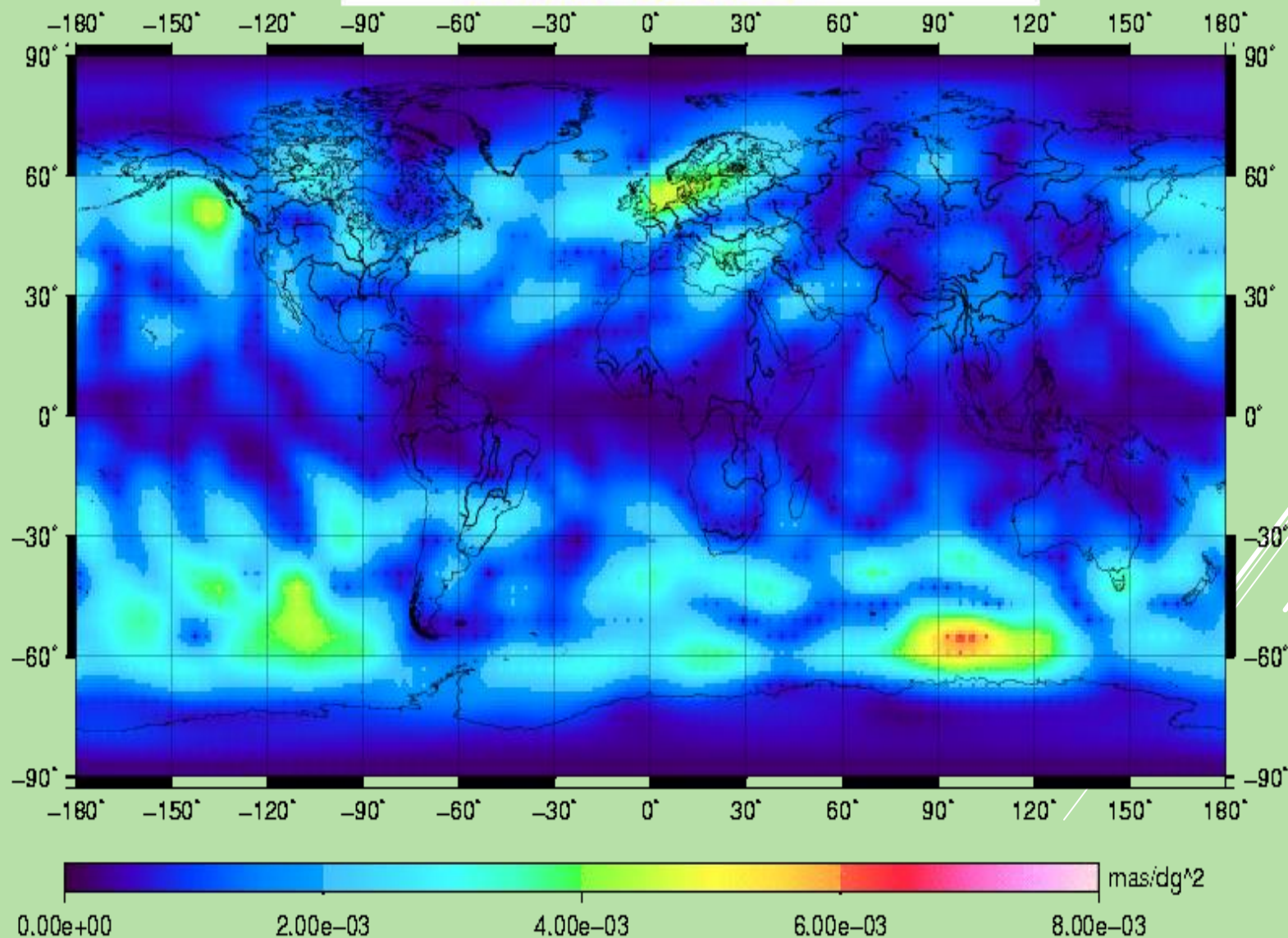
МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В ЧАНДЛЕРОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЕСМWF ДАВЛЕНИЕ

Chand 1919.631



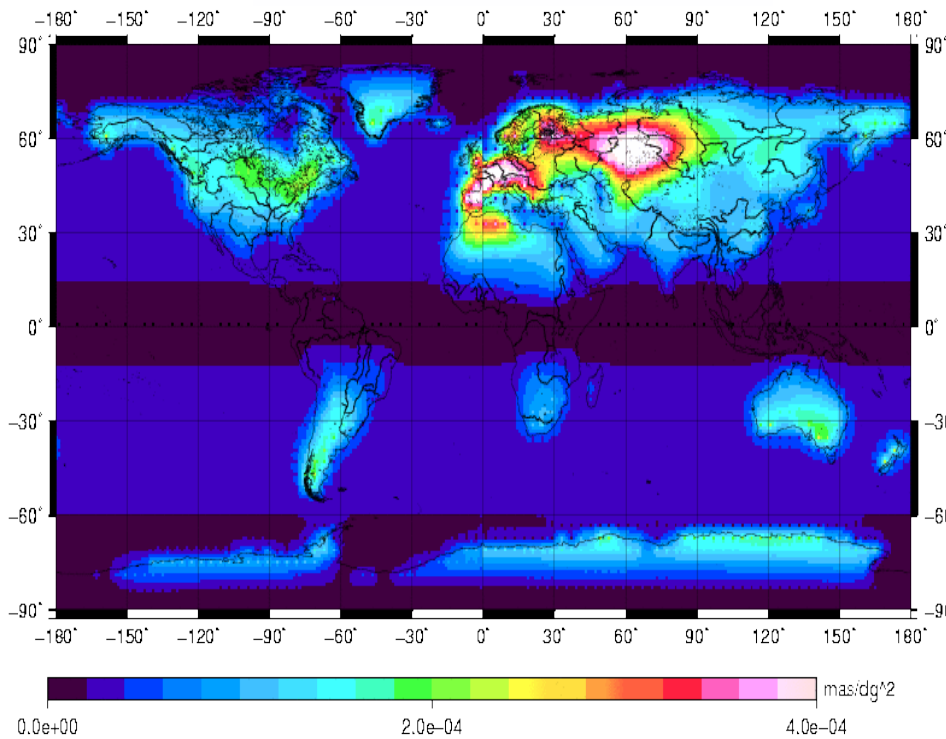
МОДУЛЬ МЕРИДИОНАЛЬНОГО ААМ В ЧАНДЛЕРОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЕСМWF ВЕТЕР

Chand 1919.631



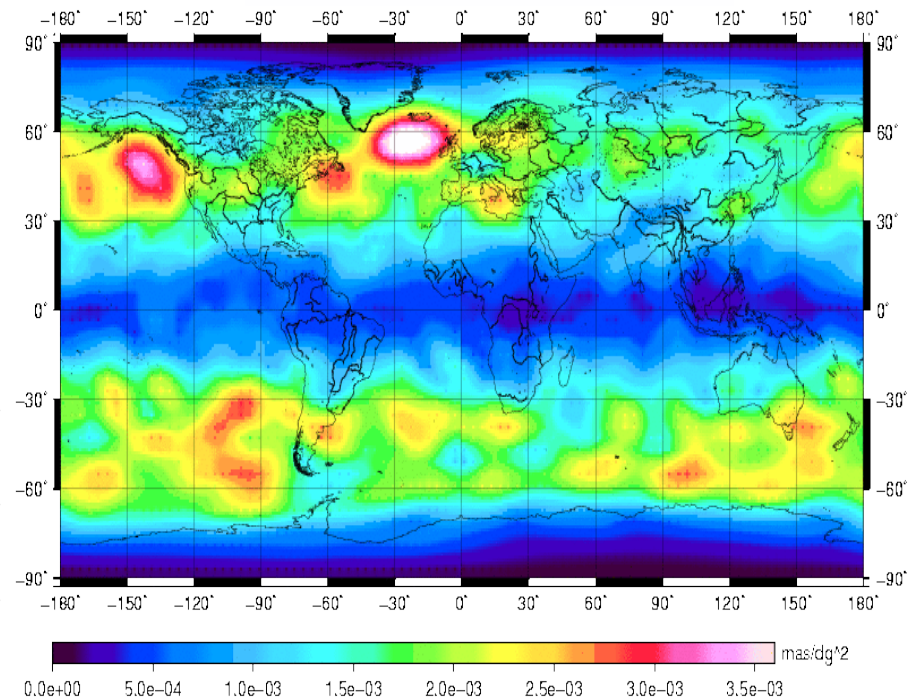
Влияние атмосферного давления и ветров на Чандлеровское колебание

mass Chandler



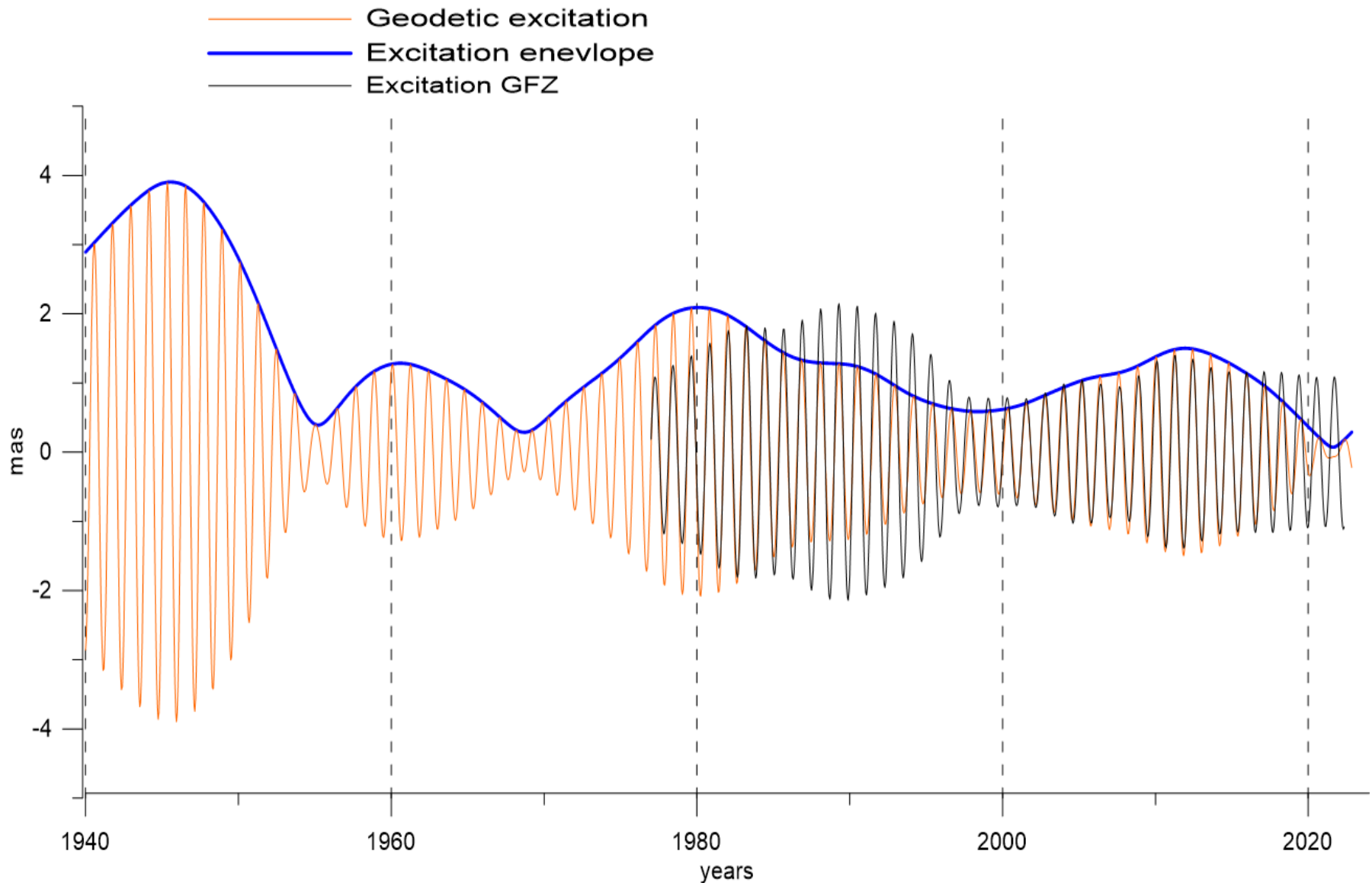
processed by L. Zotov

motion Chandler



processed by L. Zotov

Возбуждение Чандлеровского колебания атмосферой и океаном AAM+OAM



Статья

Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы

Л. В. Зотов, Н. С. Сидоренков², К. Ж. Бизуар³

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2022. № 3. С. 64

Continental and oceanic AAM contributions to Chandler Wobble with the amplitude attenuation from 2012 to 2022

Xue-Qing Xu^{1, 2}, Ming Fang¹, Yong-Hong Zhou^{1, 2}, Xin-Hao Liao^{1, 2}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

The First-time Absence of the Chandler Wobble since 2015 and its Implications for Excitation Processes

Ryuji Yamaguchi (✉ jiktm@eis.hokudai.ac.jp)

Hokkaido University: Hokkaido Daigaku <https://orcid.org/0000-0001-5210-9428>

Masato Furuya

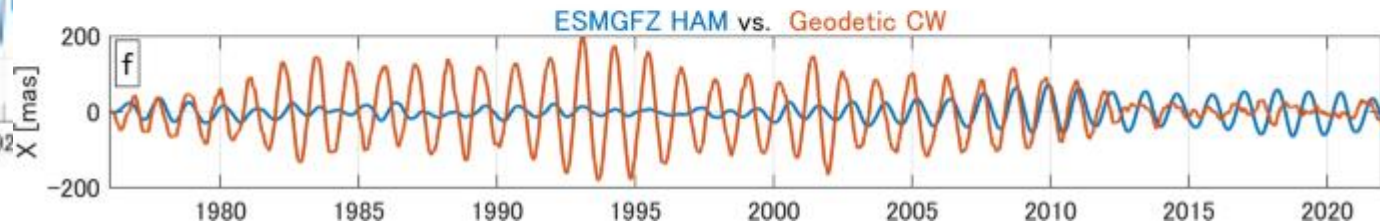
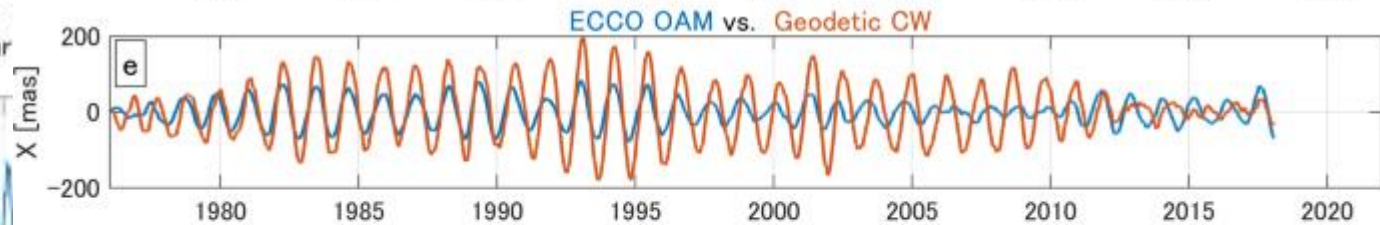
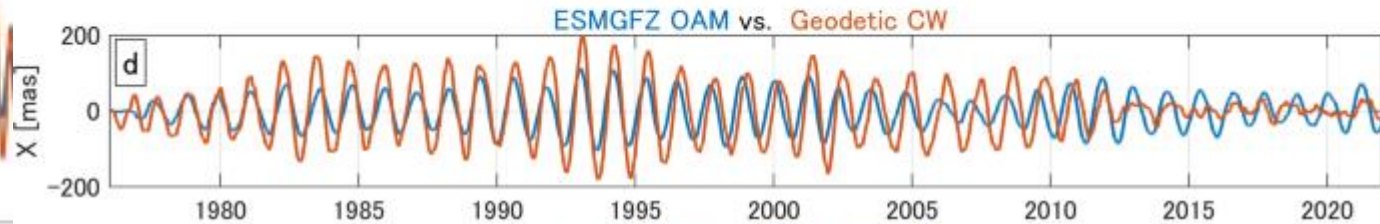
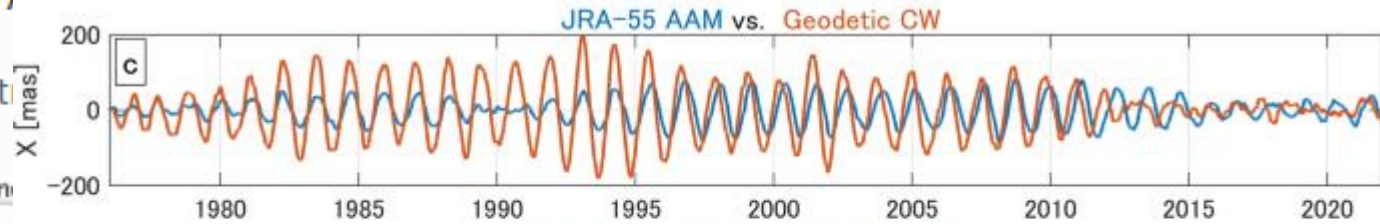
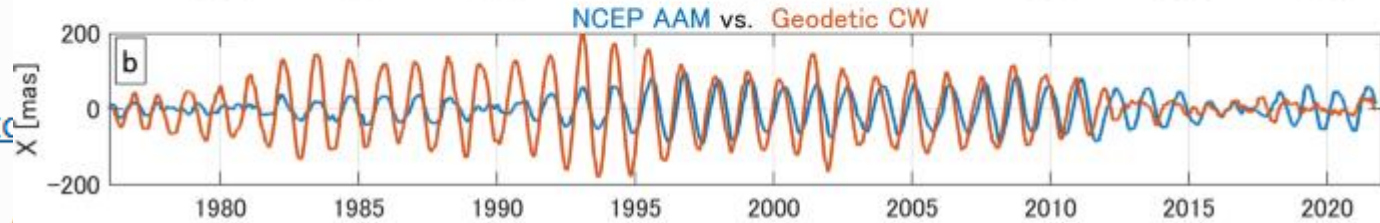
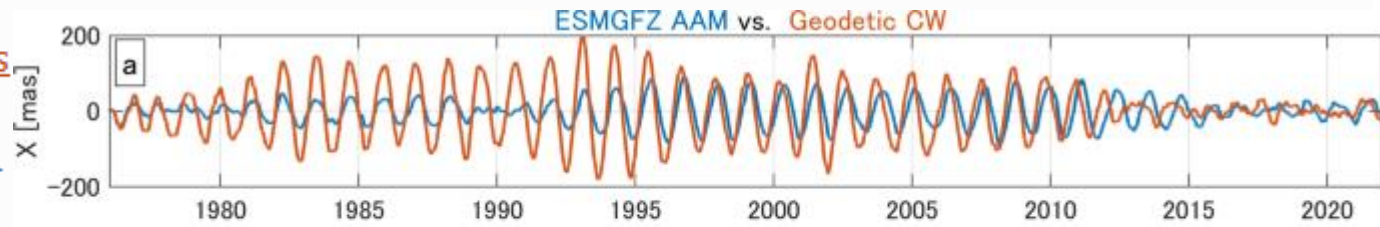
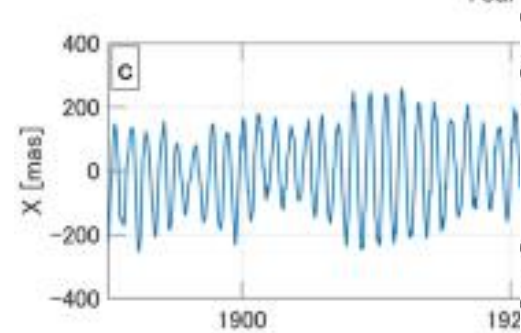
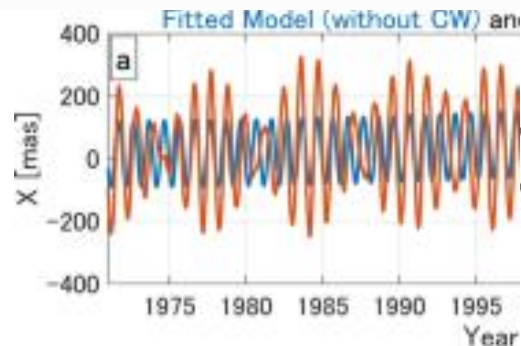
Hokkaido University: Hokkaido Daigaku

Can we explain wobble?

[Ryuji Yamaguchi](#)  & [Masato](#)

[Earth, Planets and Space](#) **76**,

1905 Accesses | **11** Altmet



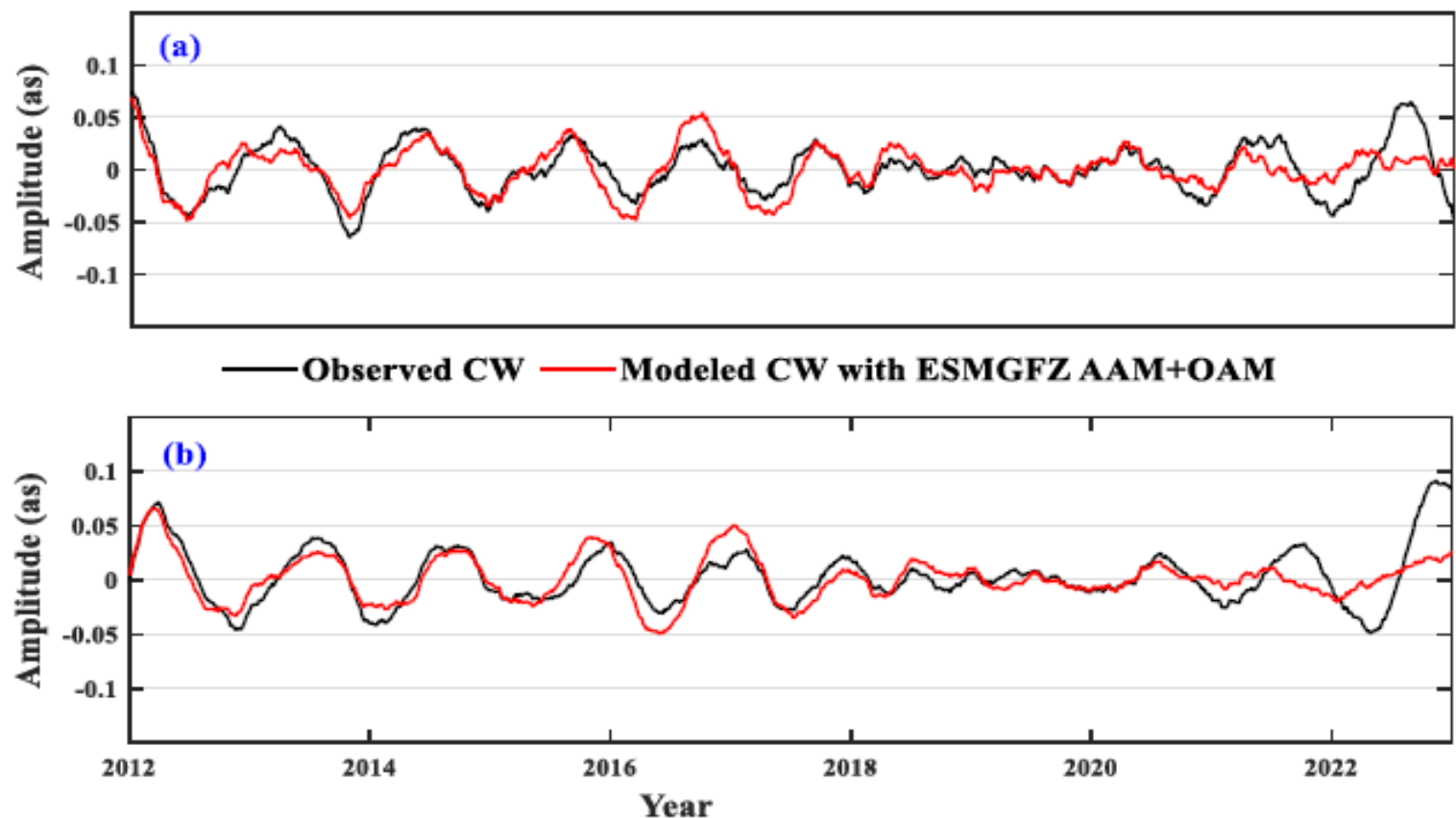


Fig. 7 Time series of the observed CW and the modeled CW with ESMGFZ AAM+OAM from 2012–2022 (a) X component, (b) Y component

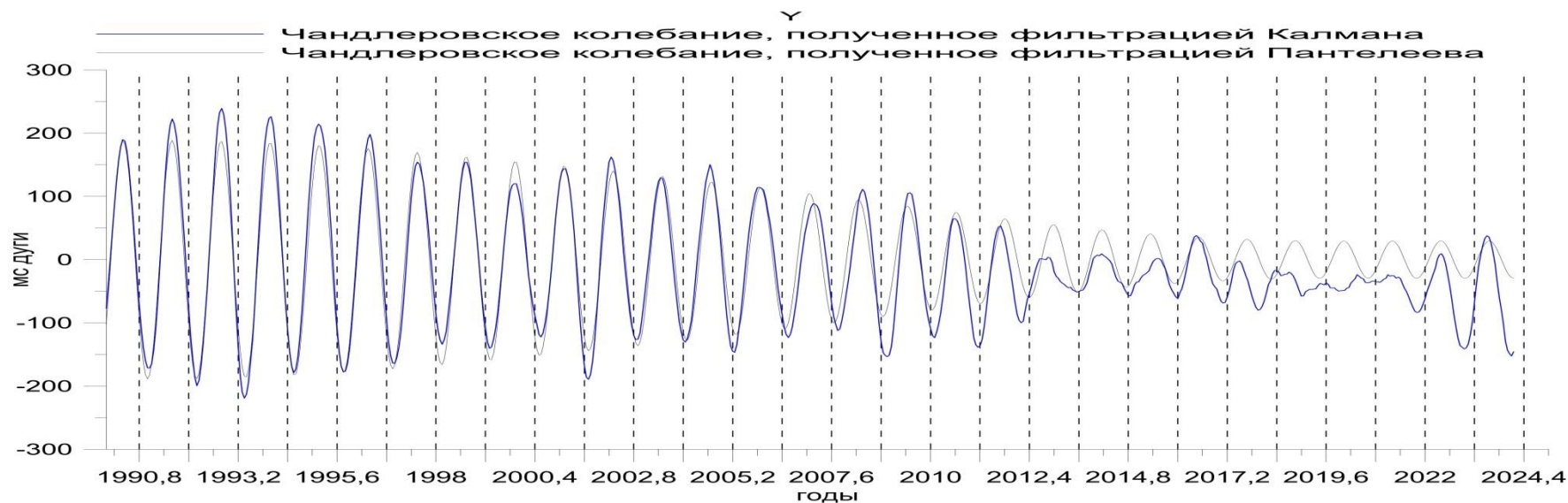
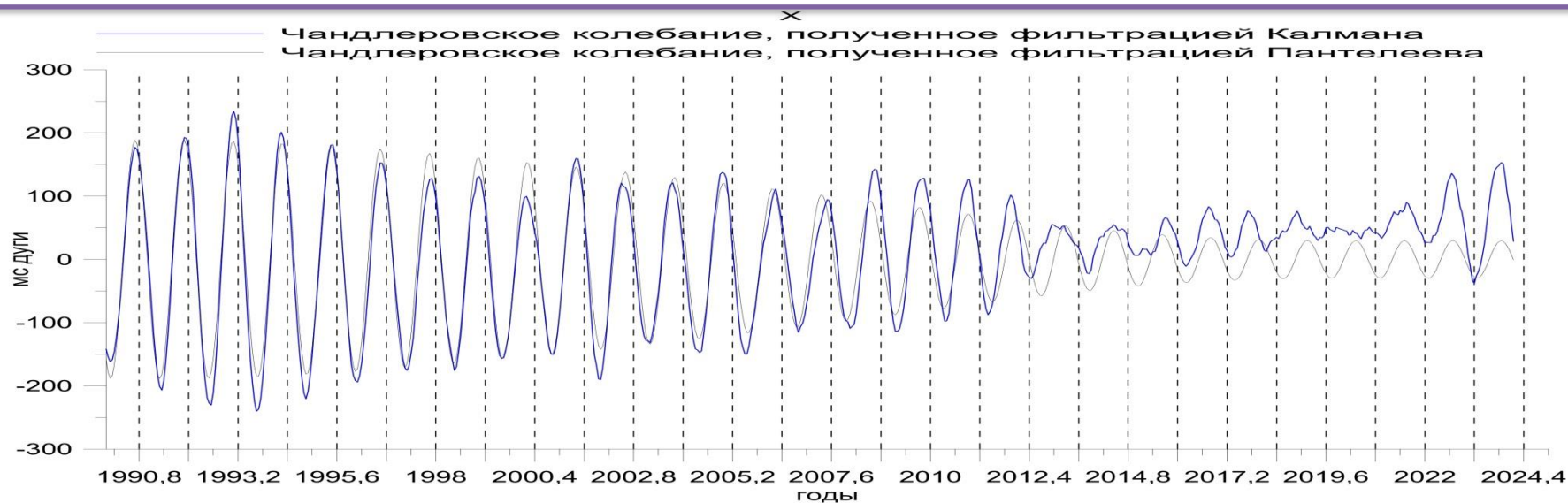
Continental and oceanic AAM contributions to Chandler Wobble with the amplitude attenuation from 2012 to 2022

Xue-Qing Xu^{1, 2}, Ming Fang¹, Yong-Hong Zhou^{1, 2}, Xin-Hao Liao^{1, 2}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

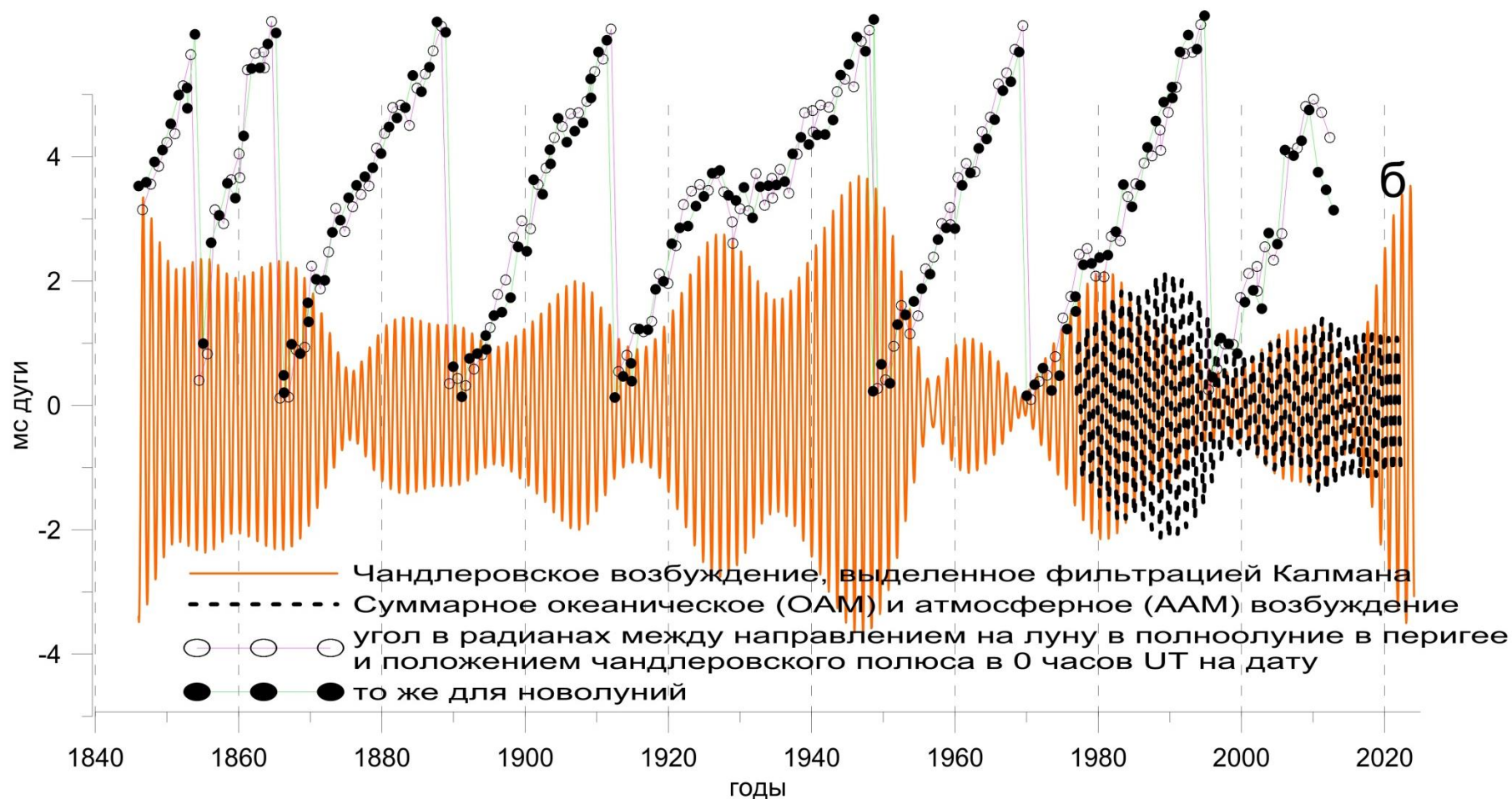
2. Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Чандлеровское колебание сегодня



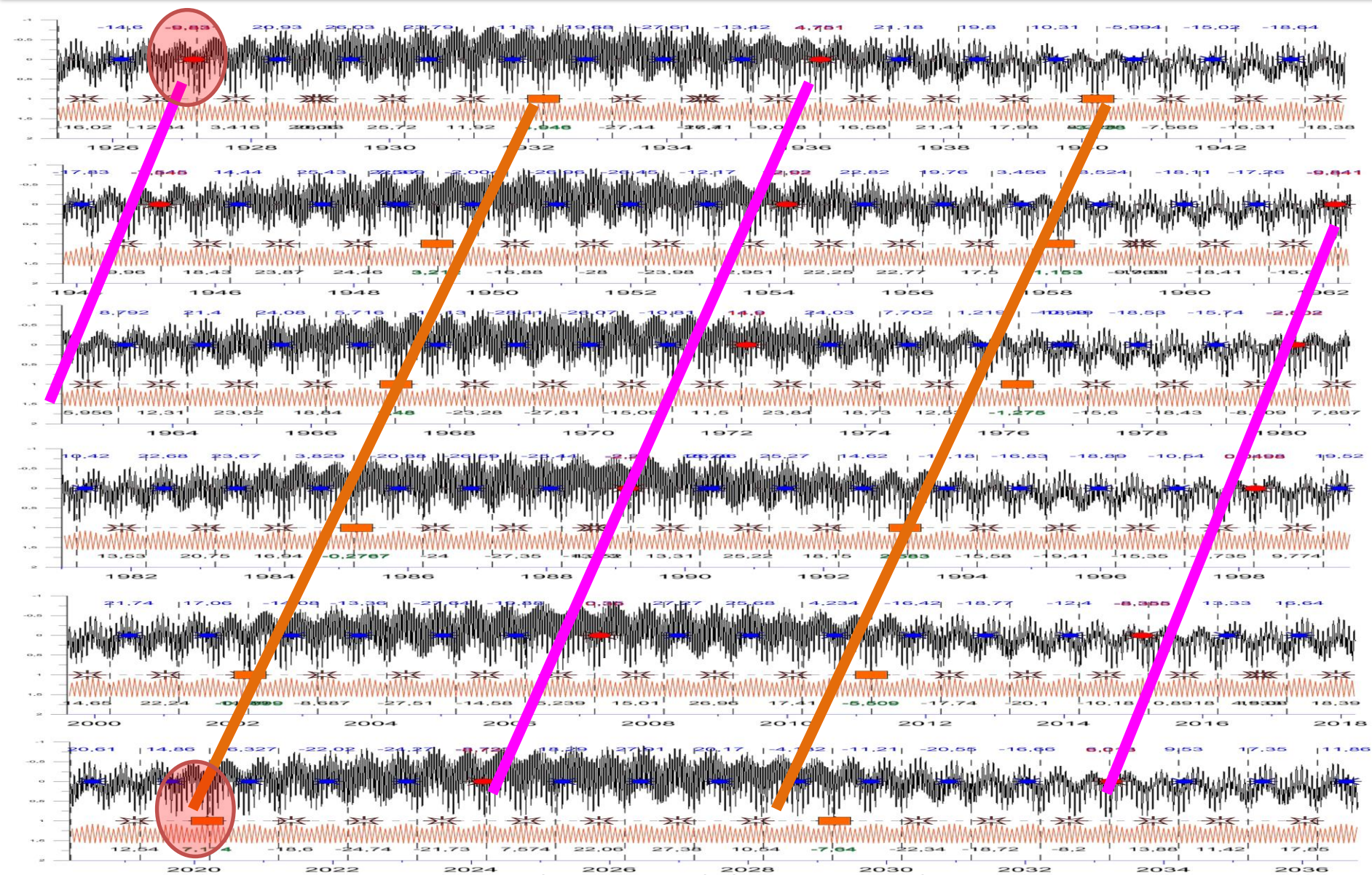
Отставание ЧДП от 412-суточного цикла больших полнолуний

$$\frac{1}{411.7} - \frac{1}{\text{от } 431 \text{ до } 434} \approx \frac{1}{\text{от } 25 \text{ до } 21 \text{ года}}$$



Большие новолуния
в Υ
Большие полнолуния

Суперлуния в перигее вблизи весеннего равноденствия
смещаются с ~ 90 -летним периодом на фоне 18.6-летней прецессии



Часы с двумя стрелками – **перигеем** и **узлом**

перигей Р



♊

♋

узел Ω



♊

♋

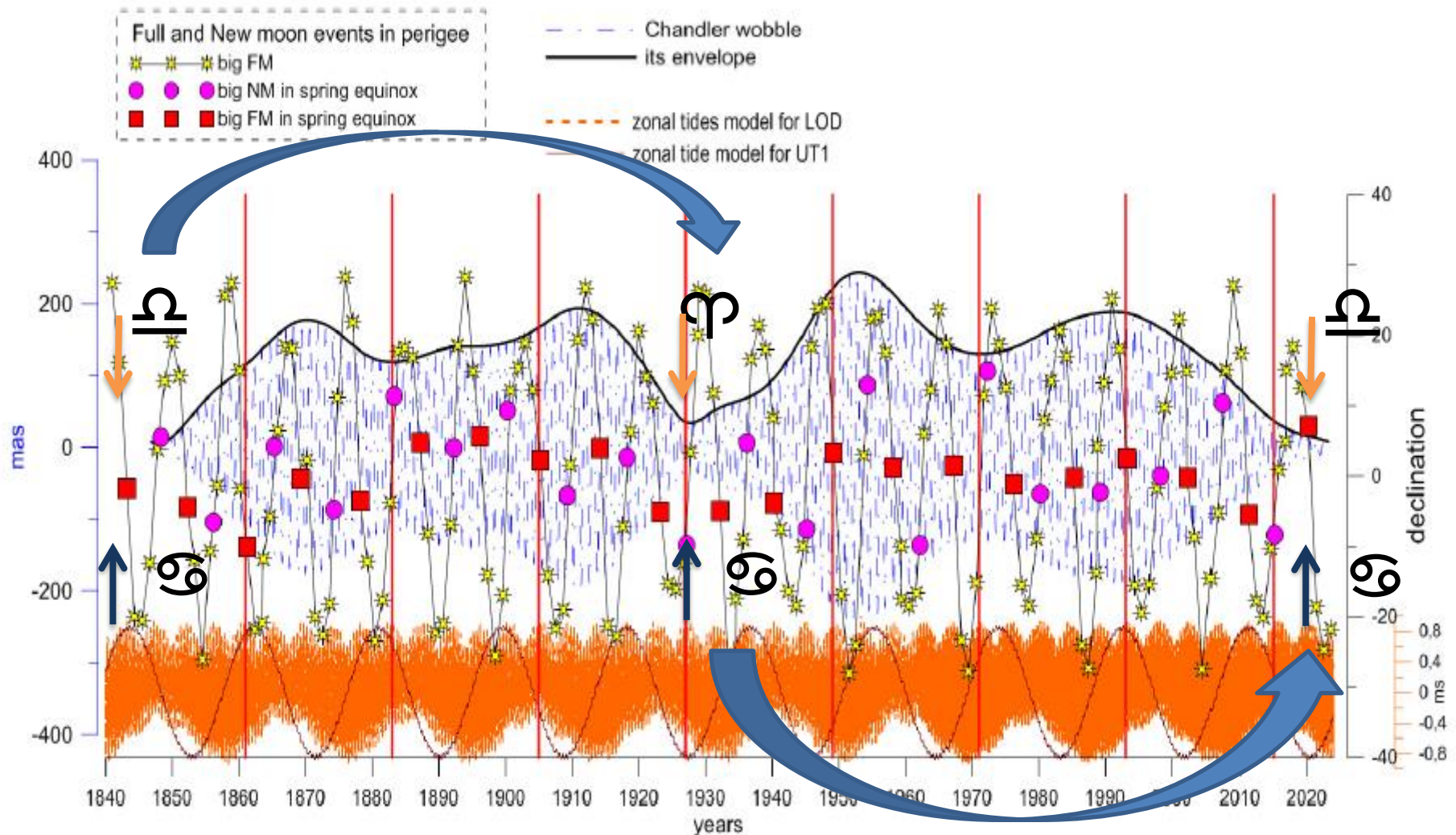
Обороты узла

♋

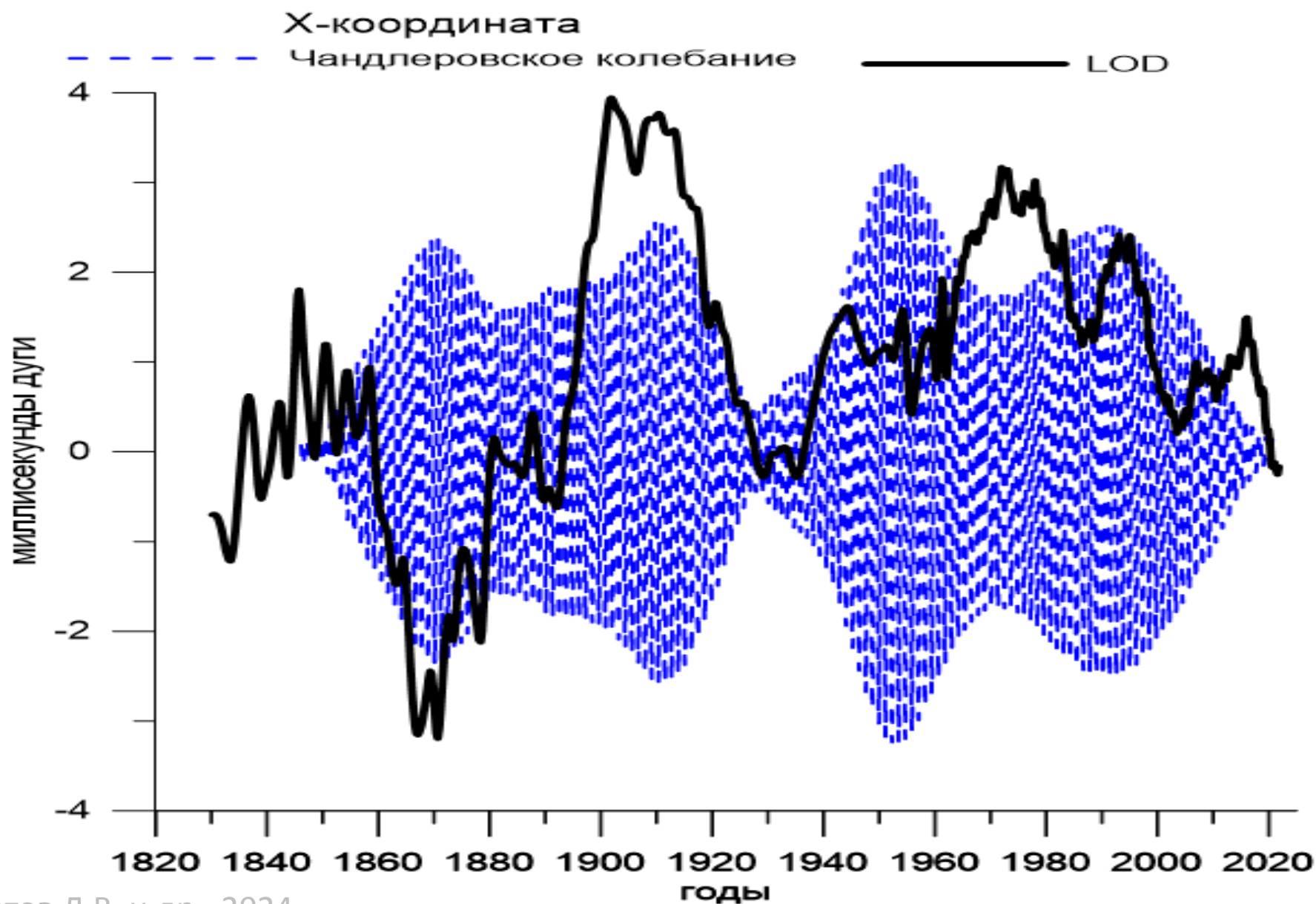
♋

Первый оборот за $18.6 - 17.7 = 0.9$ года
Второй оборот за $27.2 - 25.4 = 1.8$ года
Третий оборот за $55.8 - 53.1 = 2.7$ года
Четвертый оборот за $74.4 - 70.8 = 3.6$ года
Пять оборотов за $93 - 88.5 = 4.5$ года

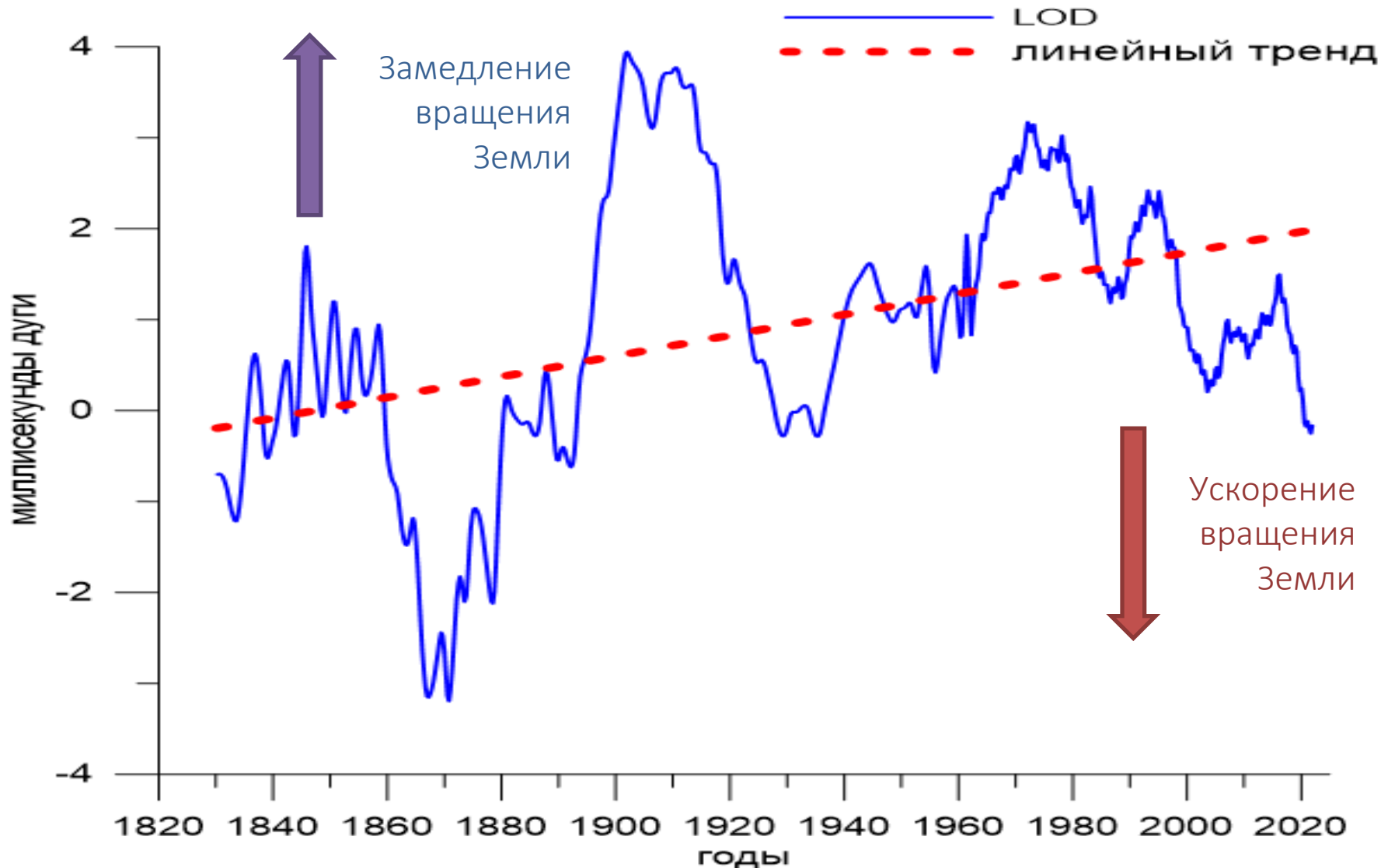
Причина раскачки и подавления Чандлеровского колебания

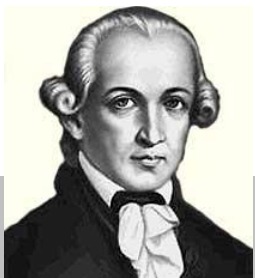


Чандлеровское колебание и LOD с 1840 г

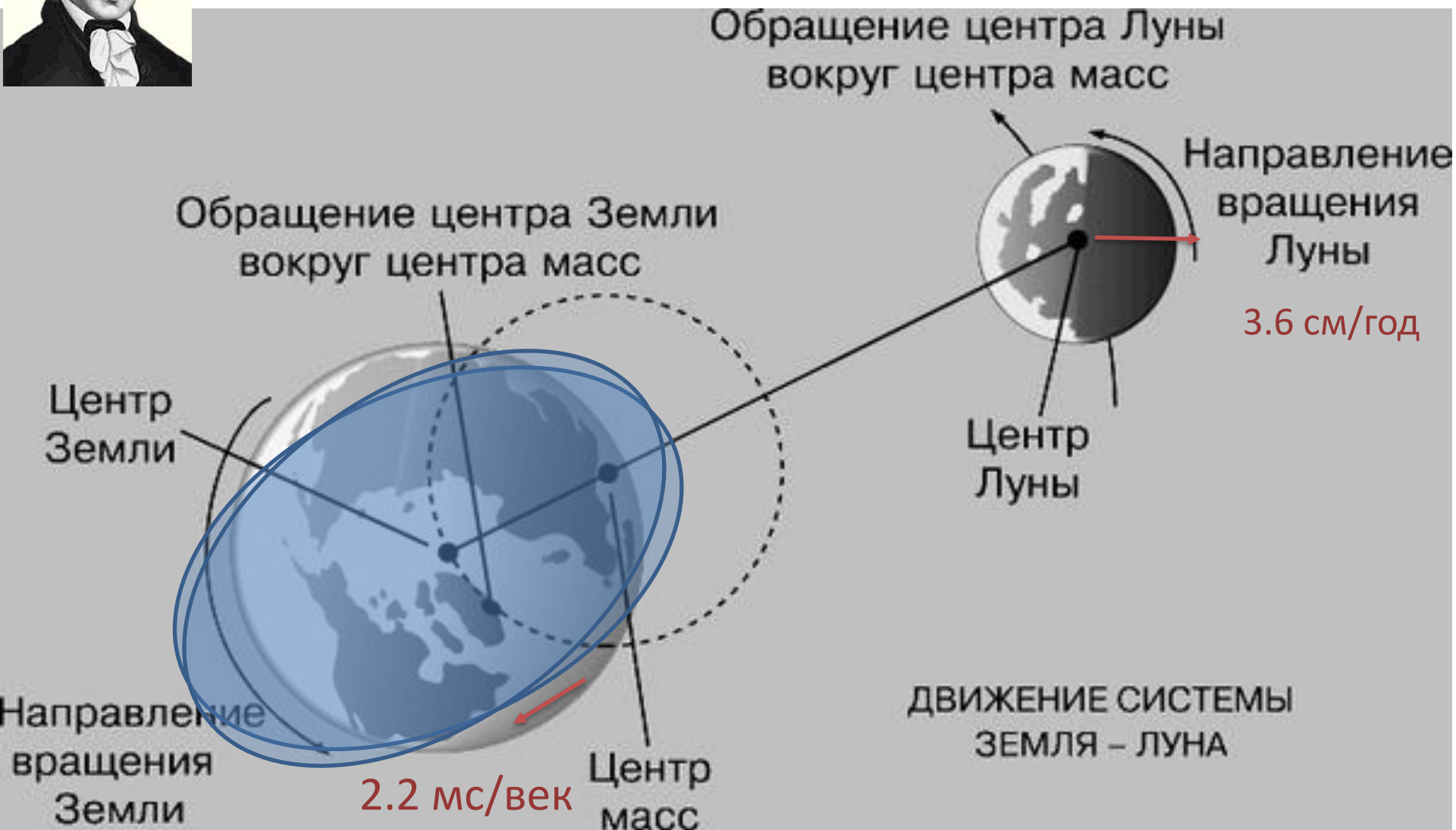


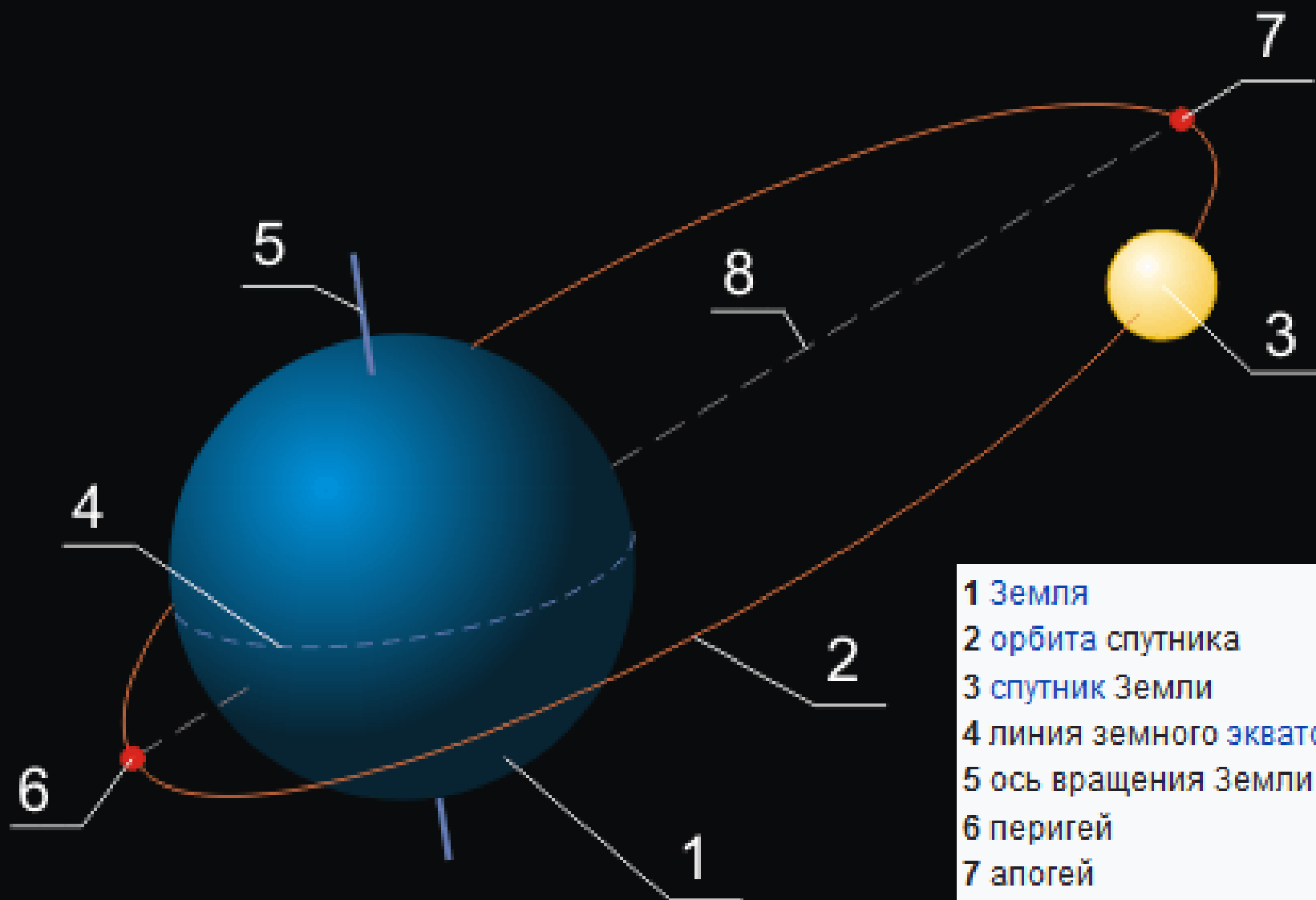
Долговременные изменения длительности суток LOD обратной к скорости вращения Земли





Иммануил Кант предсказал
торможение Земли в 1754 г





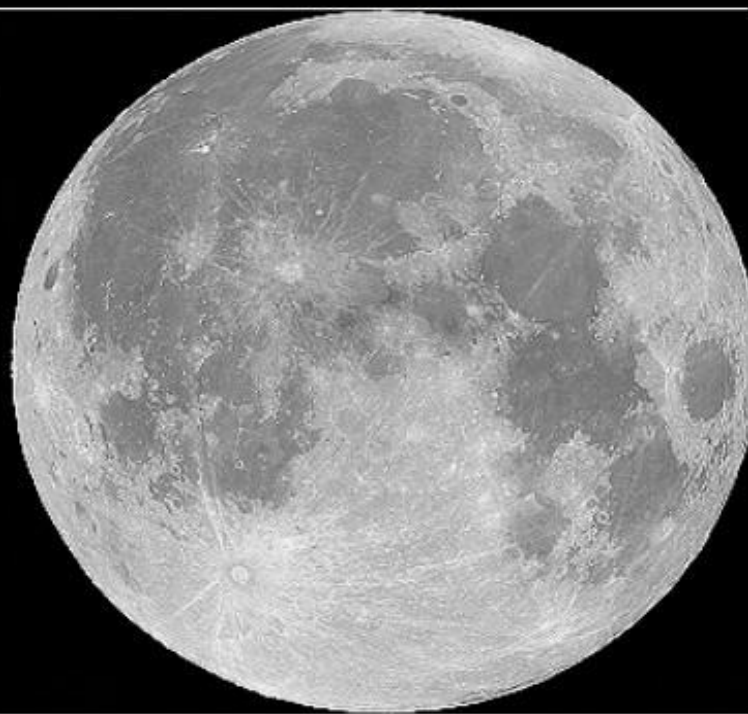
- 1 Земля
- 2 орбита спутника
- 3 спутник Земли
- 4 линия земного экватора
- 5 ось вращения Земли
- 6 перигей
- 7 апогей
- 8 линия апсид

Апогей



24 марта 2024 г
406252 км

Перигей

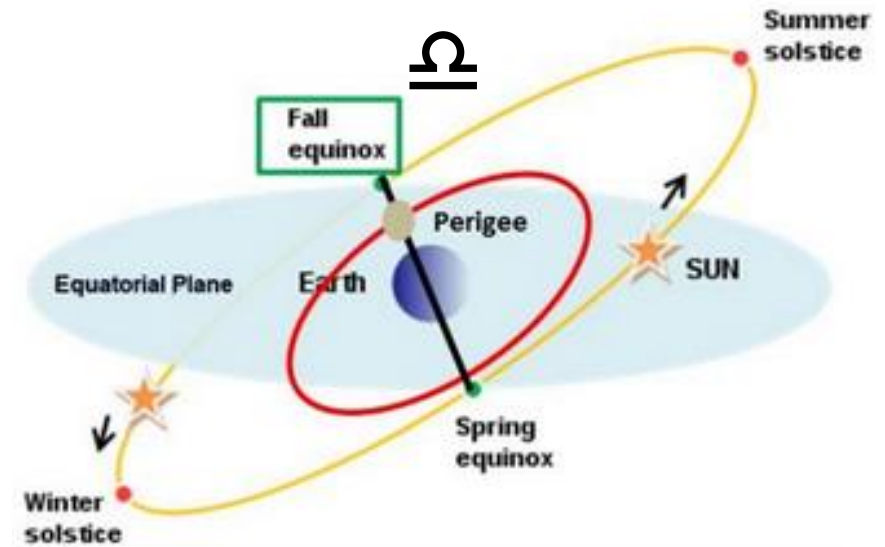
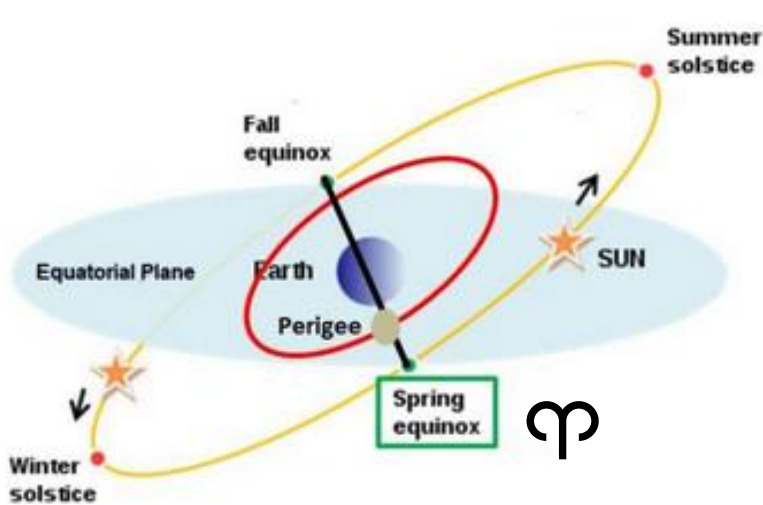


8 апреля 2024 г
358910 тыс км

A Luni-Solar Connection to Weather and Climate

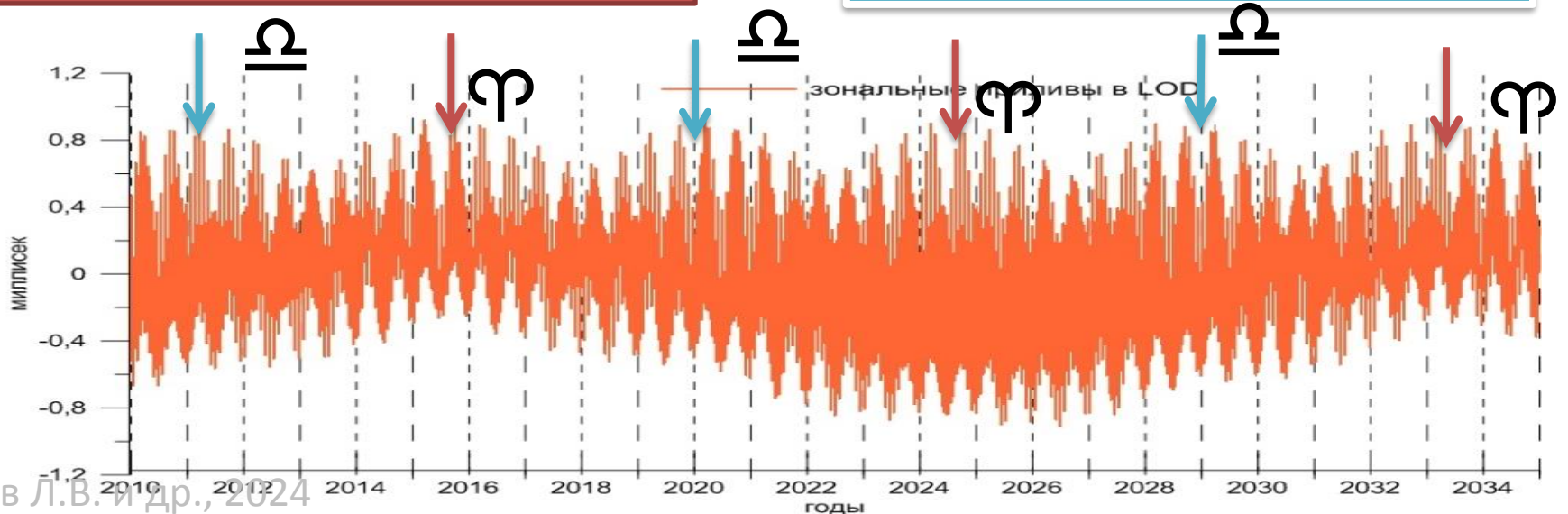
II: Extreme Perigean New/Full Moons and El Niño Events

Ian R.G. Wilson*¹ and Nikolay S. Sidorenkov²



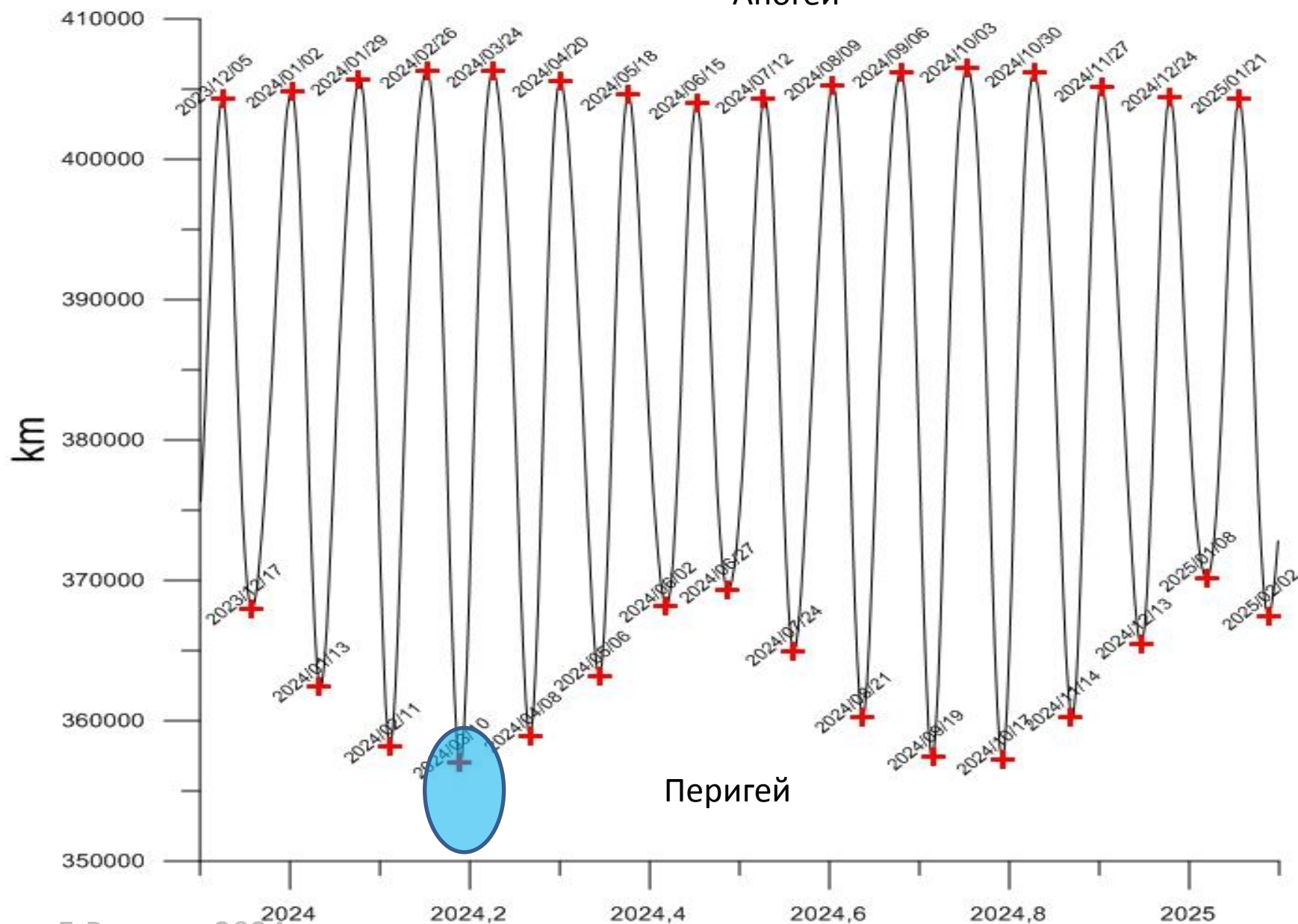
Перигей в весеннем равноденствии

Перигей в осеннем равноденствии



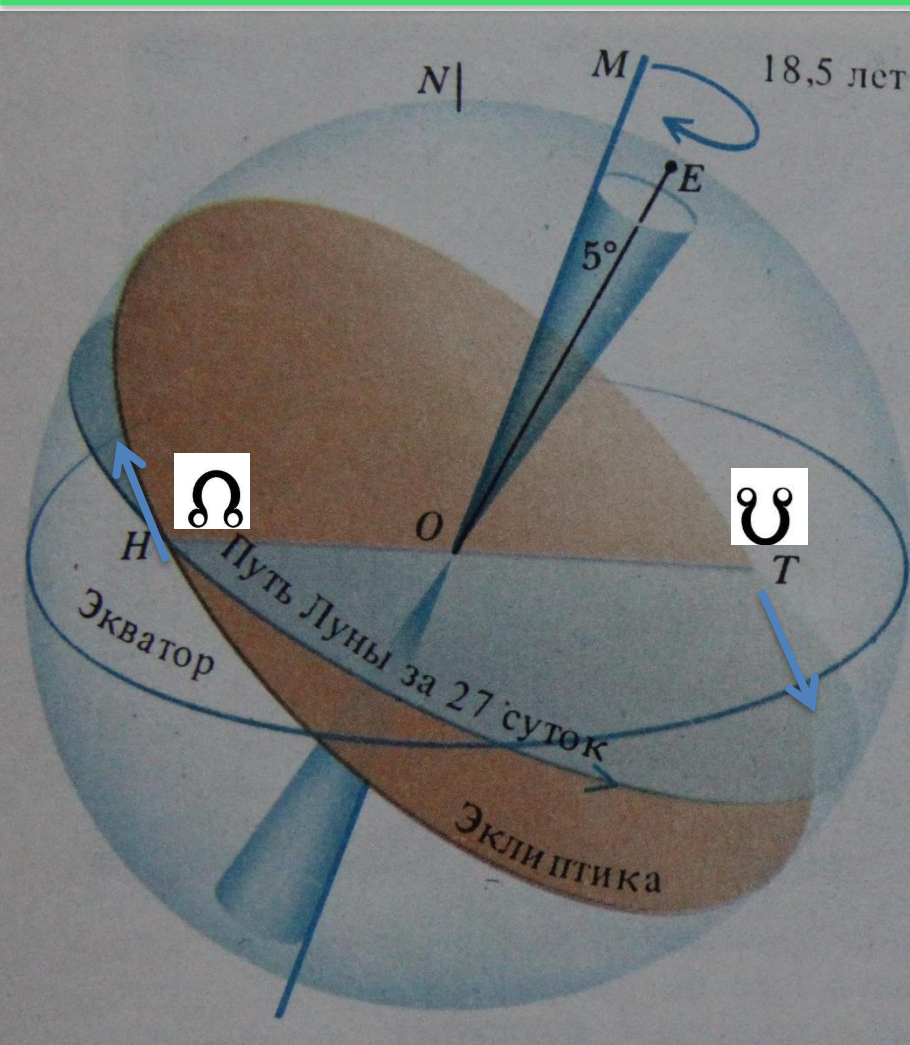
Расстояние до Луны

Апогей



Перигей

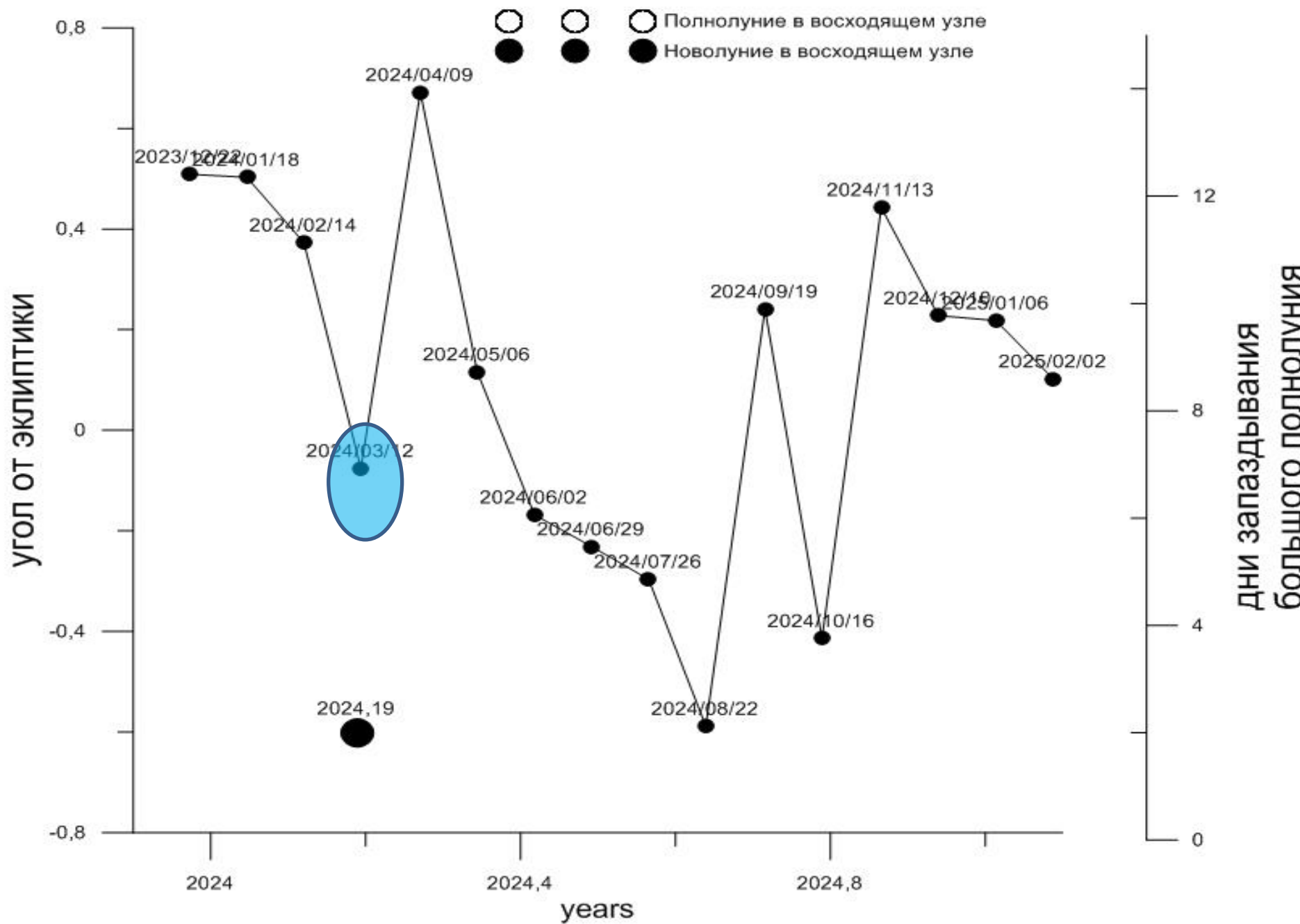
Узлы Лунной орбиты и 18-6-летняя прецессия



Траектория Луны на небесной сфере представляет собой большой круг, наклоненный под углом 5° к траектории Солнца (эклиптике). Полярная ось OM , перпендикулярная плоскости лунной орбиты, описывает конус вокруг (почти) неподвижной оси OE , перпендикулярной плоскости эклиптики; в результате линия HT , вдоль которой пересекаются плоскости орбит Солнца и Луны, поворачивается с востока на запад, совершая полный оборот за 18,6 лет.

- точки пересечения лунной орбиты с эклиптикой

Прохождение восходящего узла



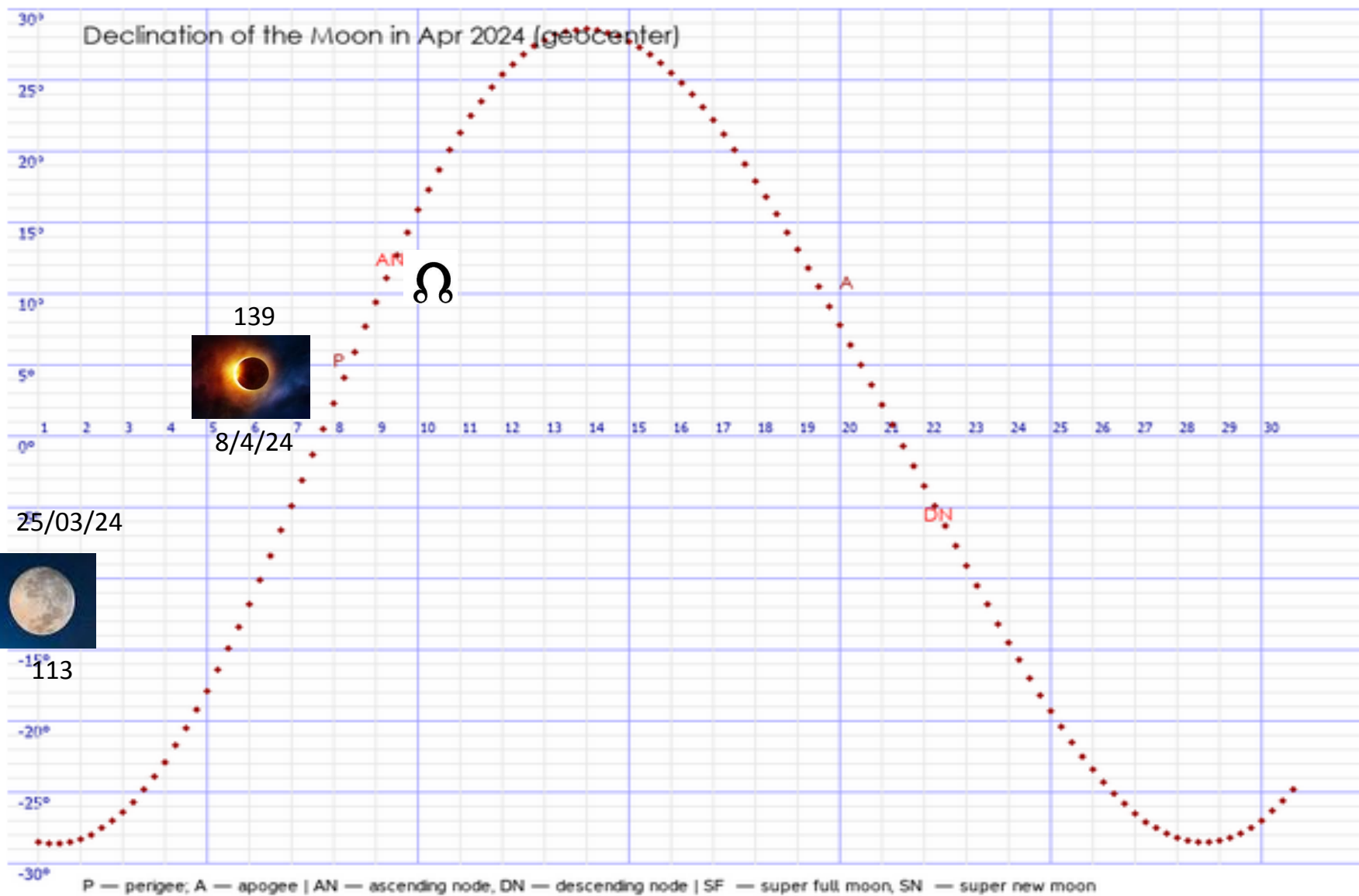
АПРЕЛЬ



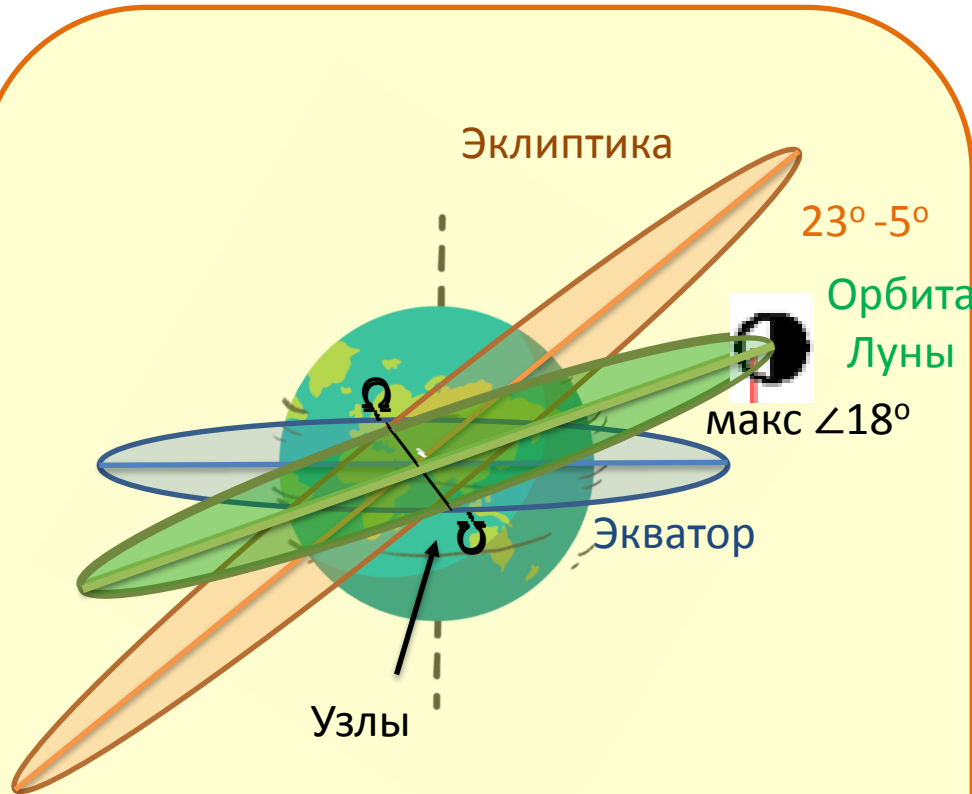
2024



Вывести



18.6—летняя прецессия орбиты Луны

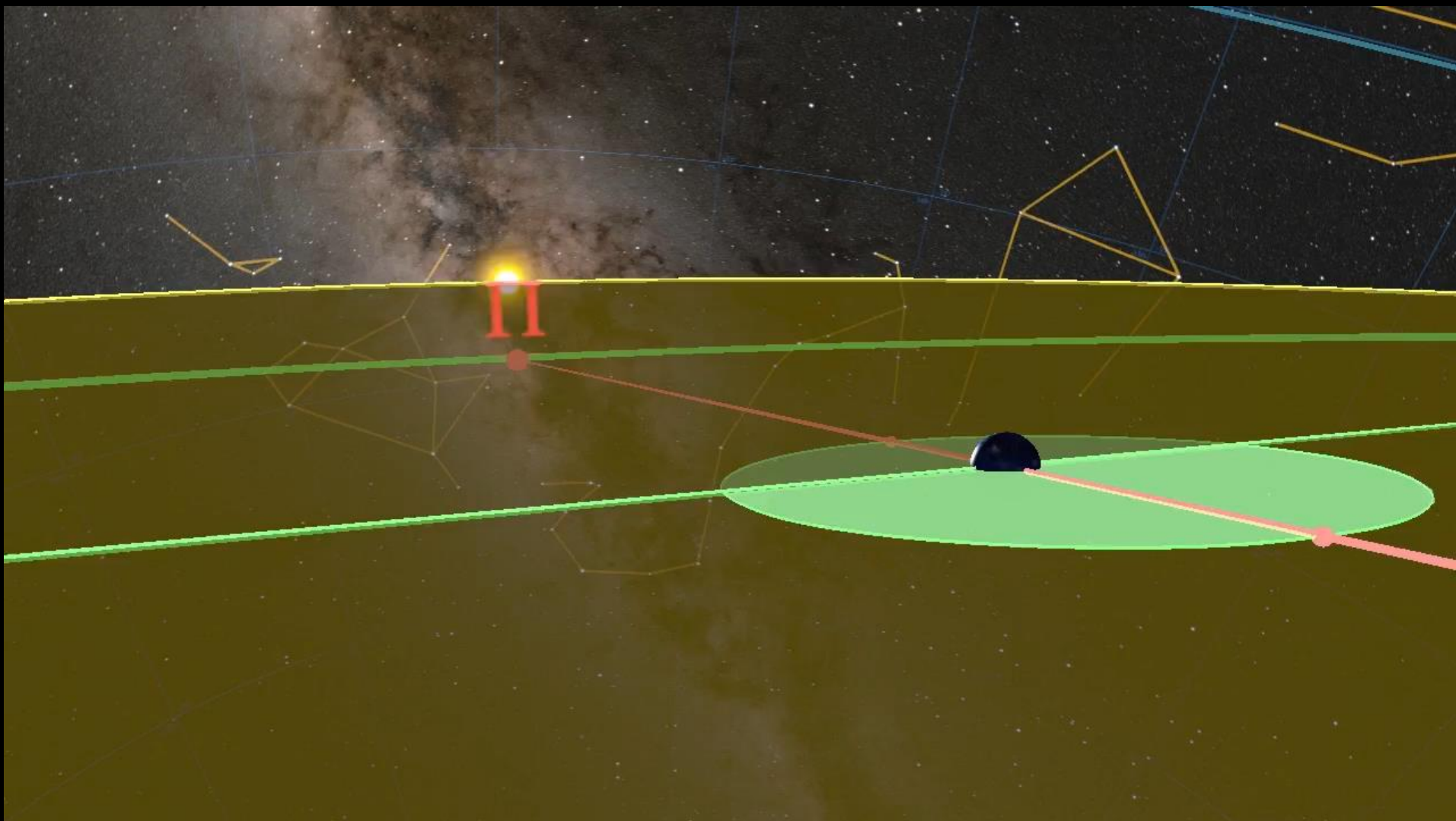


Орбита Луны между экватором и эклиптикой



Орбита Луны над эклиптикой

Движение перигея и узлов навстречу друг другу





ESD Ideas: A 6-year oscillation in the whole Earth system?

Anny Cazenave^{1,2}, Julia Pfeffer², Mioara Manda³, and Veronique Dehant⁴

¹Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales, Toulouse, 31400 France

²Magellium, Ramonville St Agne, 31520 France

³Centre National d'Etudes Spatiales, Paris, 75039 Cedex 01 France

⁴Royal Observatory of Belgium, Brussels, B1180 Belgium

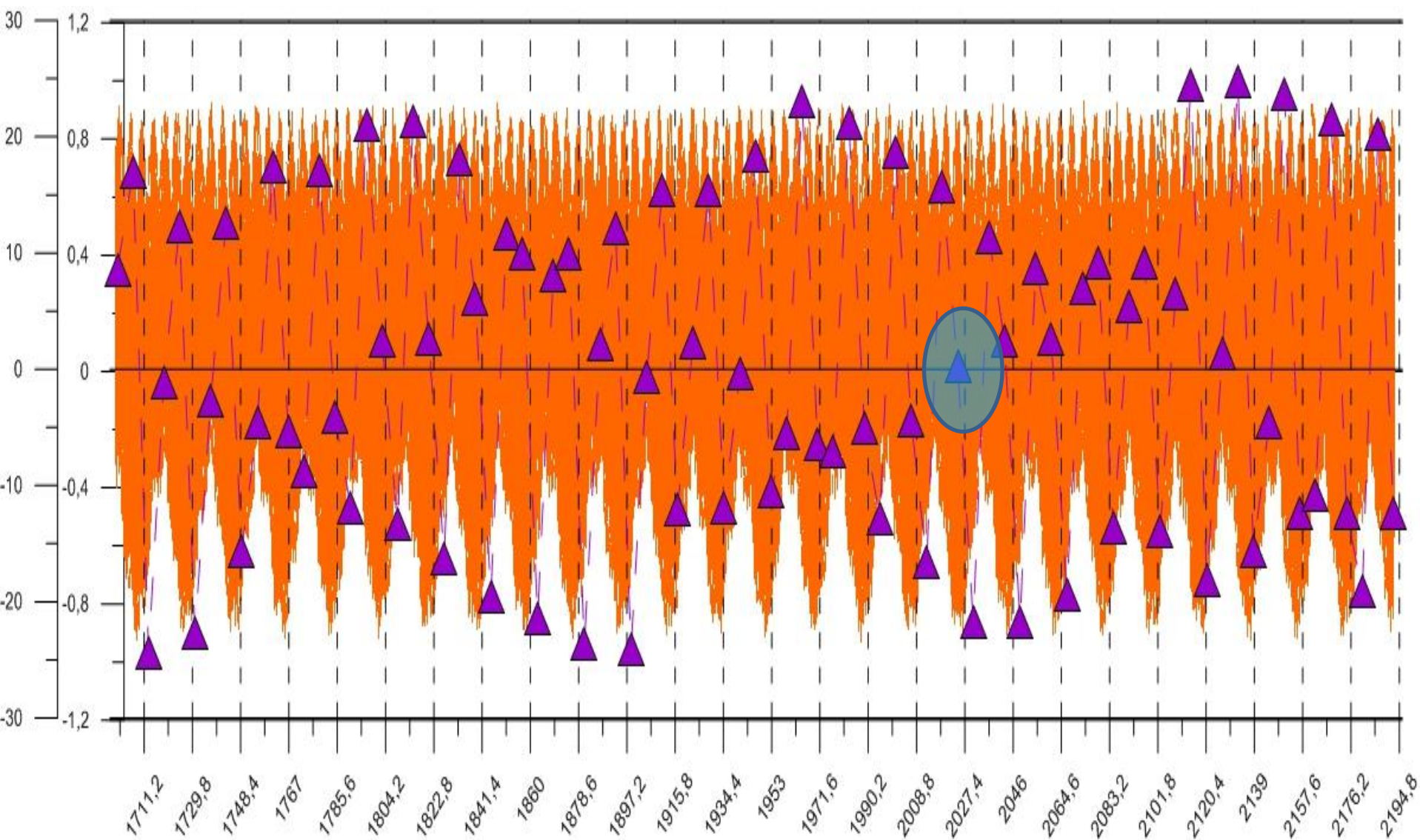
Correspondence: Anny Cazenave (anny.cazenave@gmail.com)

Received: 21 February 2023 – Discussion started: 8 March 2023

Revised: 4 July 2023 – Accepted: 5 July 2023 – Published: 4 August 2023

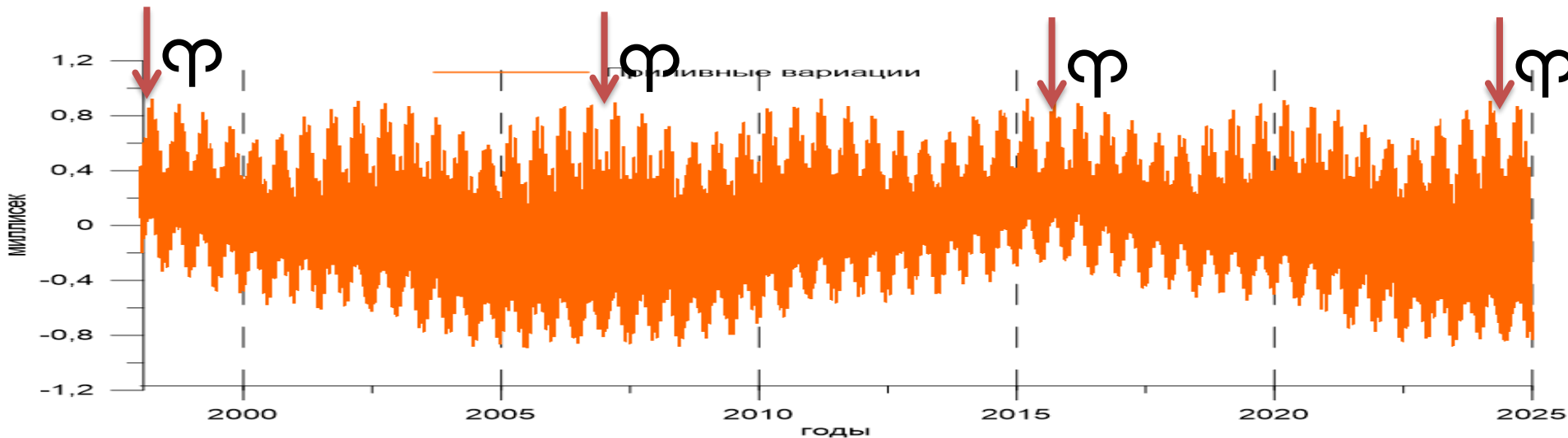
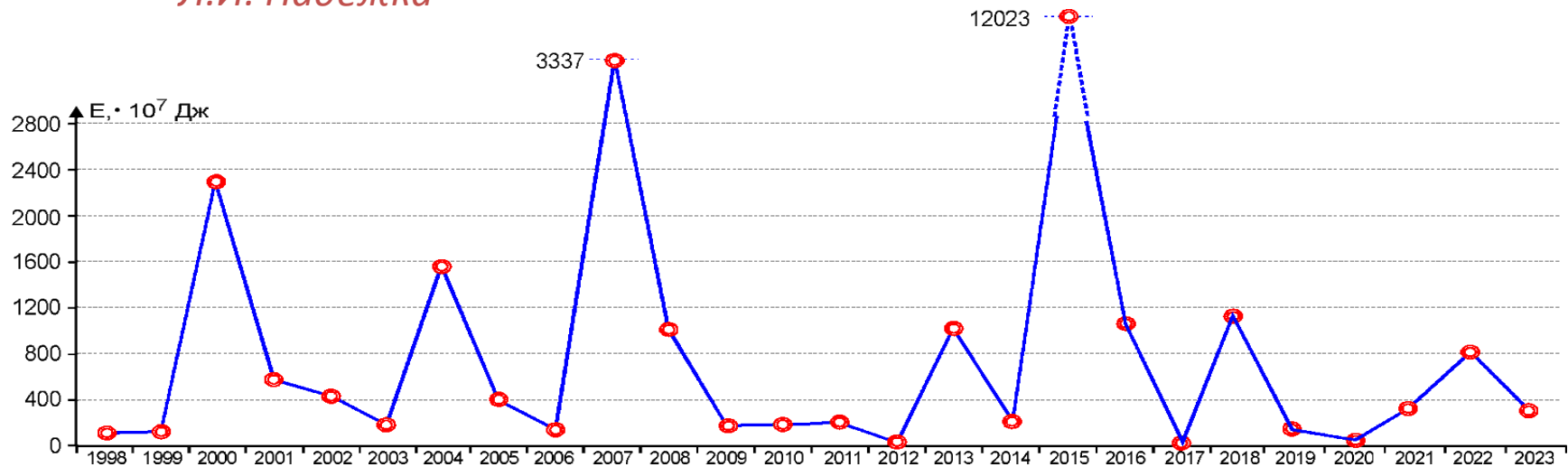
Abstract. An oscillation of about 6 years has been reported in Earth's fluid core motions, magnetic field, rotation, and crustal deformations. Recently, a 6-year cycle has also been detected in several climatic parameters (e.g., sea level, surface temperature, precipitation, land hydrology, land ice, and atmospheric angular momentum). Here, we suggest that the 6-year oscillations detected in the Earth's deep interior, rotation, and climate are linked together and that the core processes previously proposed as drivers of the 6-year cycle in the Earth's rotation additionally cause the atmosphere to oscillate together with the mantle, inducing fluctuations in the climate system with similar periodicities.

Встречи перигея и узла каждые 6 лет и их склонения



*Временное распределение сейсмической энергии,
выделившейся при землетрясениях,
произошедших на территории ВКМ (1998 – 2023 гг.)*

*Материалы
Л.И. Надежка*



Выберите месяц и год:

МАРТ

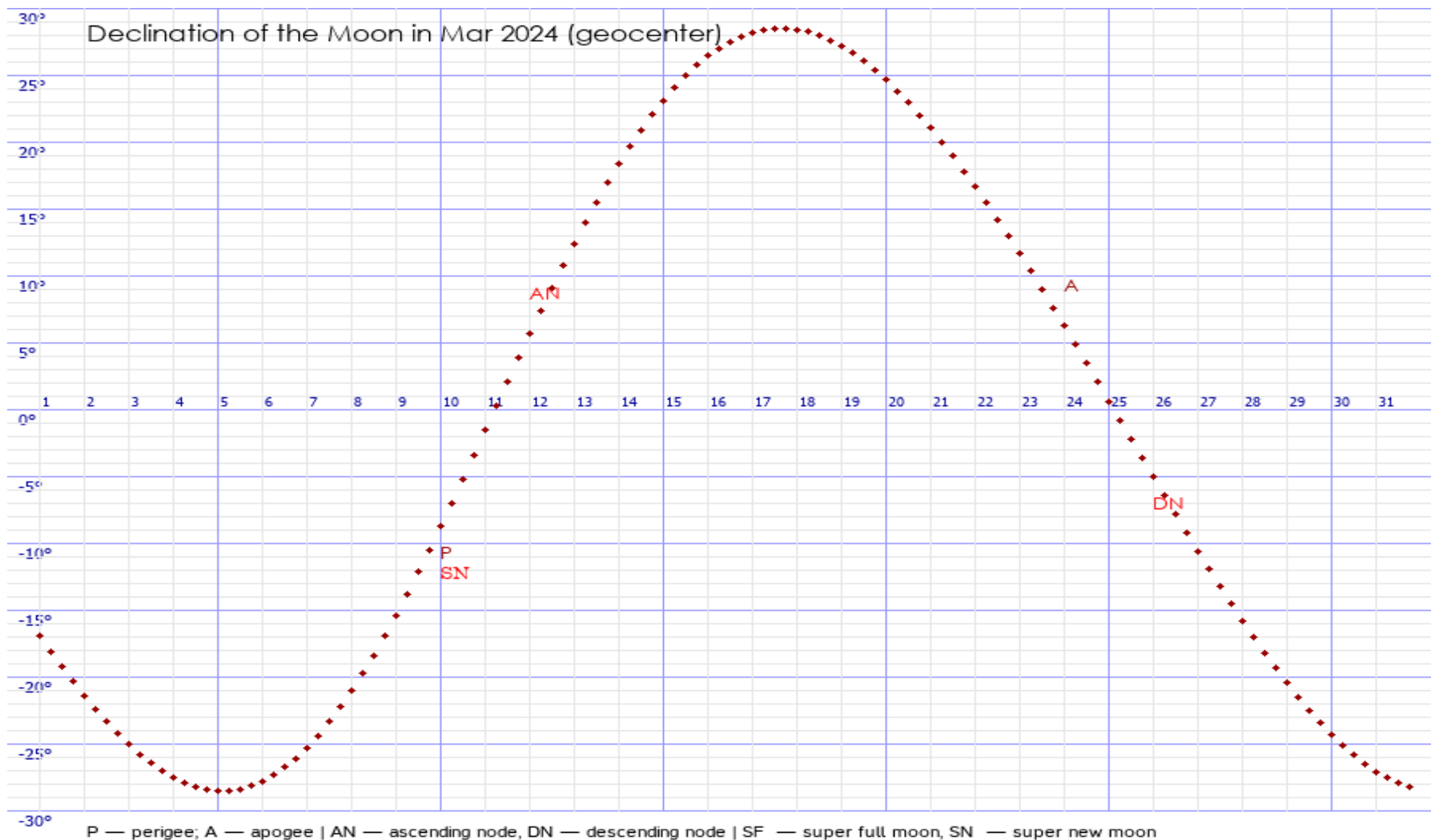


2024

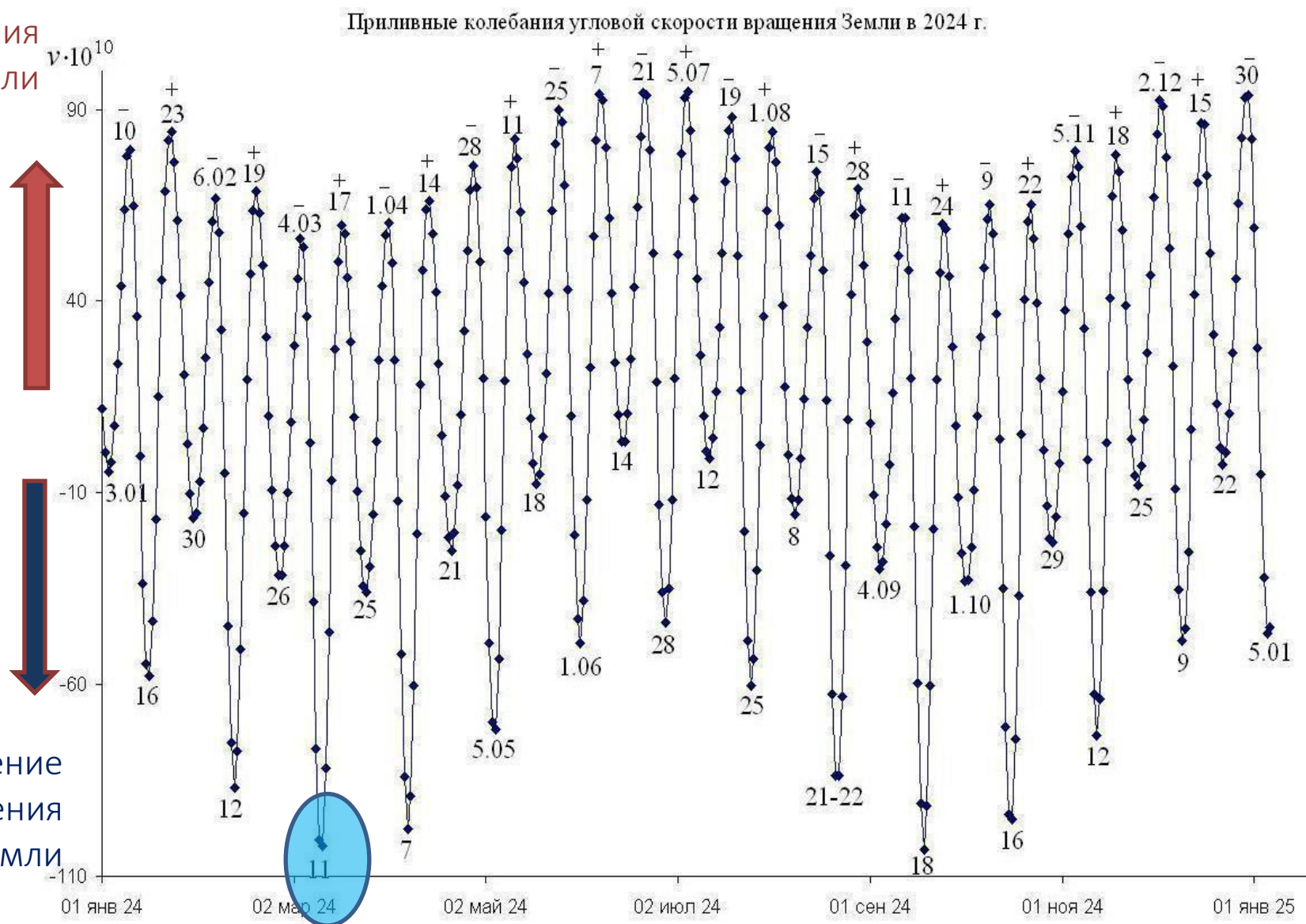


Вывести

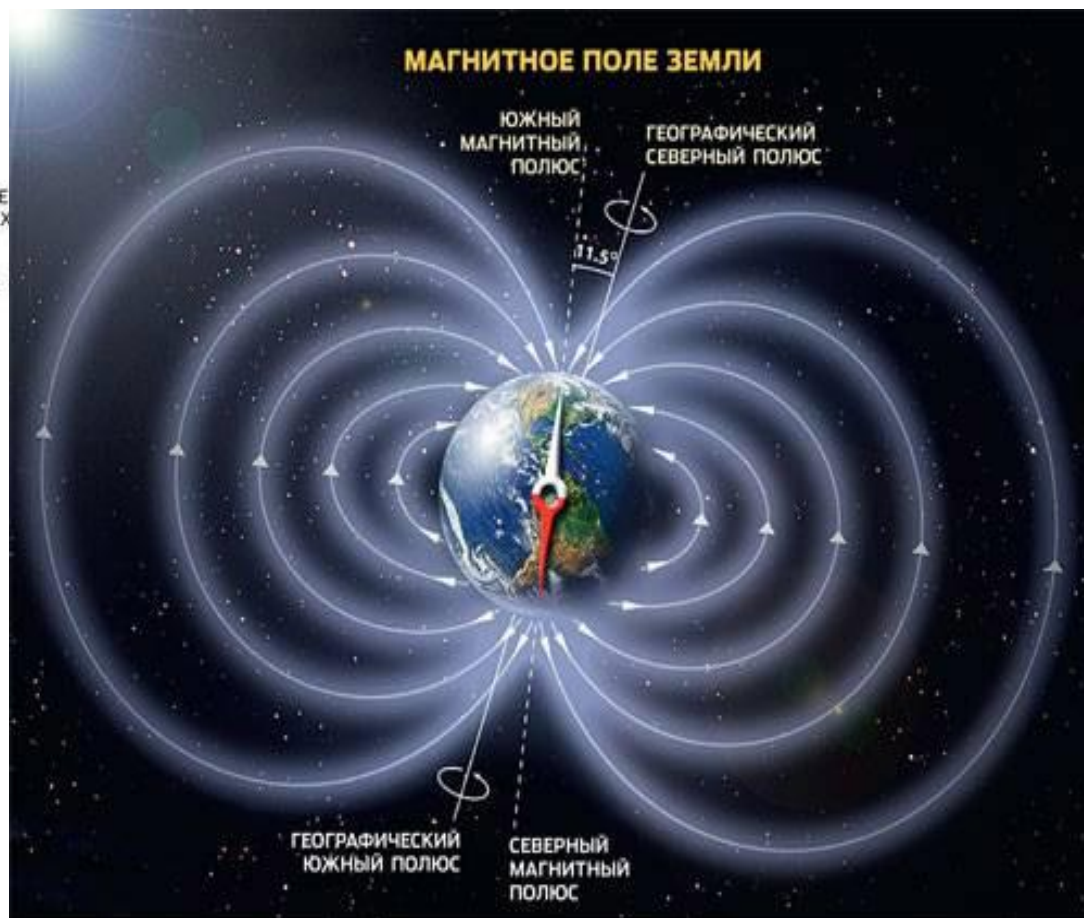
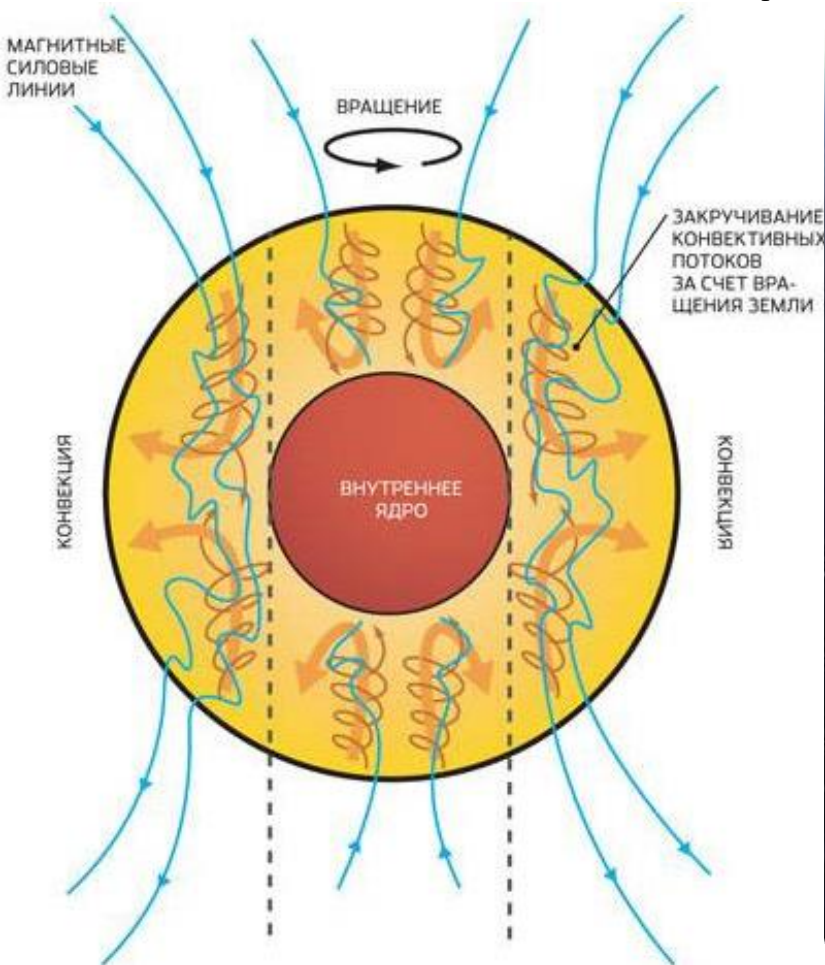
<https://astropage.ru/guide/moon/decl/>



замедление
вращения
Земли



Обмен моментом на границе ядро-мантия?



Выводы

- Чандлеровское движение полюса исчезло в 1930-е и 2020-е с изменением фазы
- в амплитудных изменениях чандлеровского возбуждения и LOD обнаруживаются сходные декадные колебания
- интегральный атмосферный и океанический моменты импульса не вполне это объясняют
- мы считаем, что движения линии узлов и апсид луны вызывают геофизические эффекты, отражающиеся на этих явлениях
- в квазидвухлетнем колебании QBO, южном колебании Эль-Ниньо, многолетнем атлантическом колебании (АМО) в 2020-е годы проявляются экстремумы и аномальные явления
- апсидально-нодальные эффекты могут проявляться в метеорологии, гидрологии, сейсмологии, климате. Ключ к их пониманию может дать изучение вращения Земли

Спасибо за внимание!

