



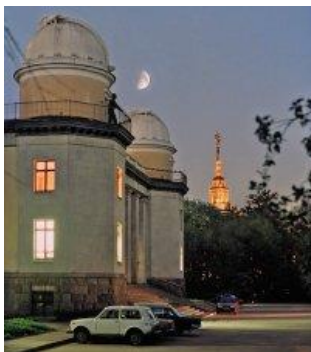
Двадцать вторая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

# Исследование возбуждения Чандлеровского движения полюса

Леонид Зотов<sup>1,2</sup>, Николай Сидоренков<sup>3</sup>

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

<sup>3</sup>Гидрометцентр РФ



**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

11 ноября 2024

ИКИ РАН





# Некоторые элементы теории движения полюса

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

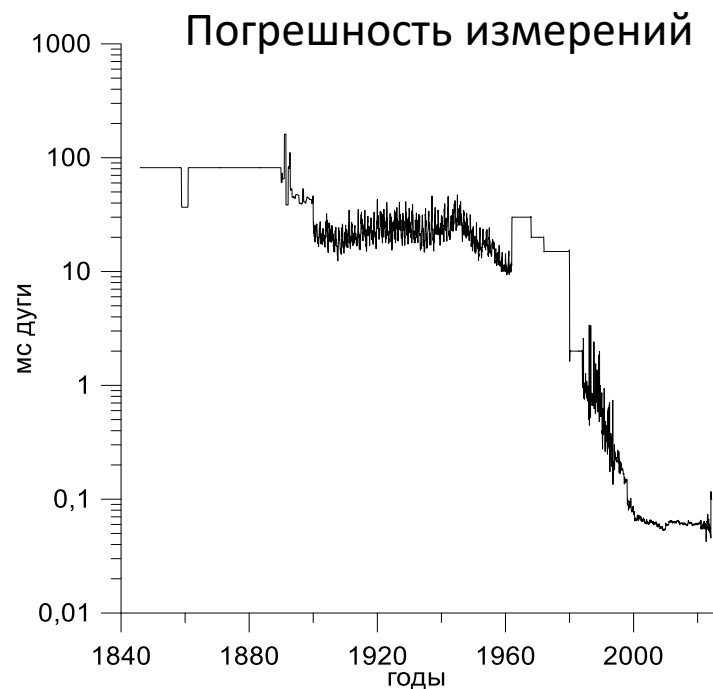
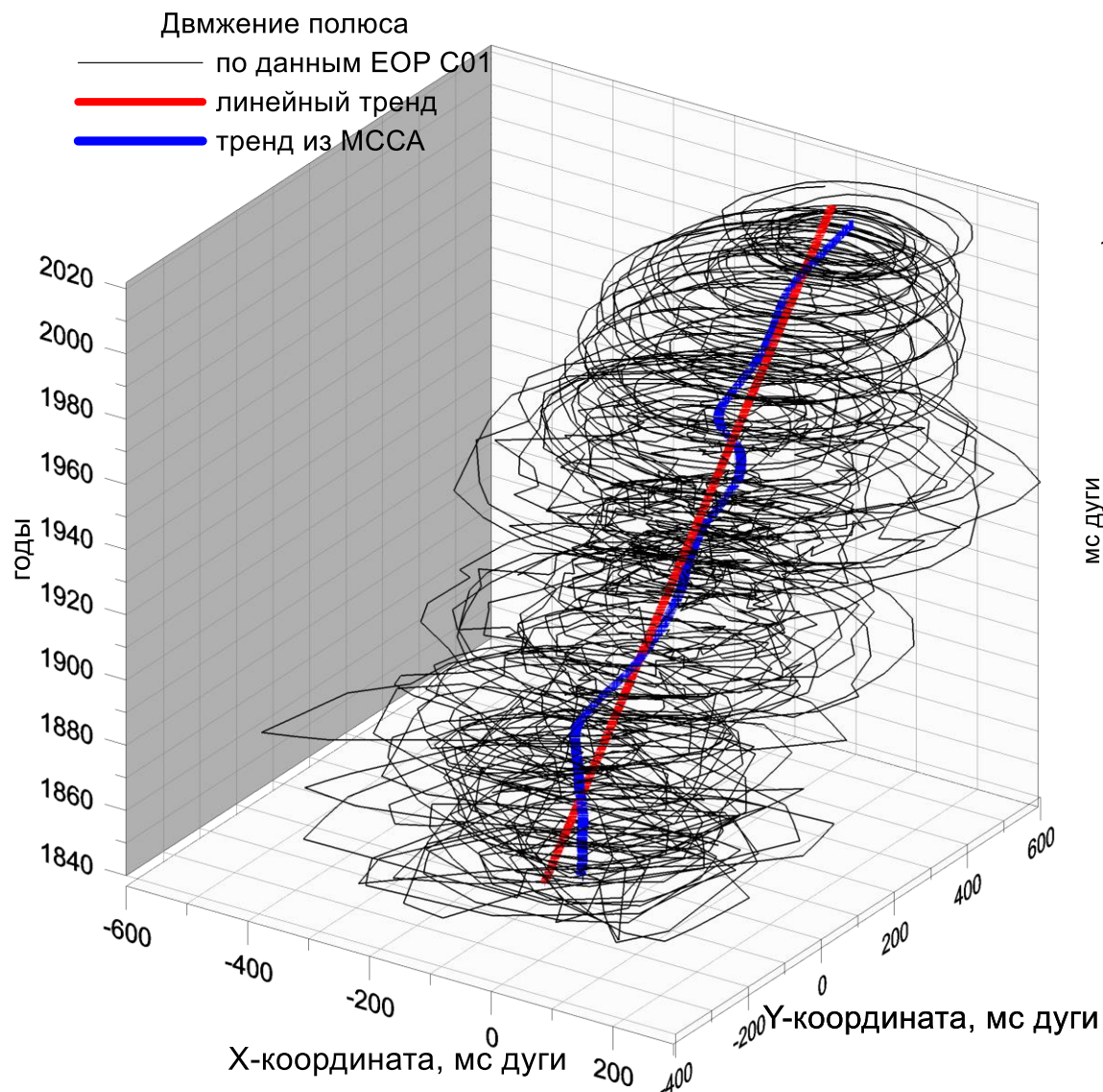
$$\chi_e^{mass} = \frac{1 + k'_2}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{mass}, \quad \chi_e^{motion} = \frac{1}{1 - \tilde{k}_2/k_s} \chi^{motion}.$$

Геодезическое  
возбуждение

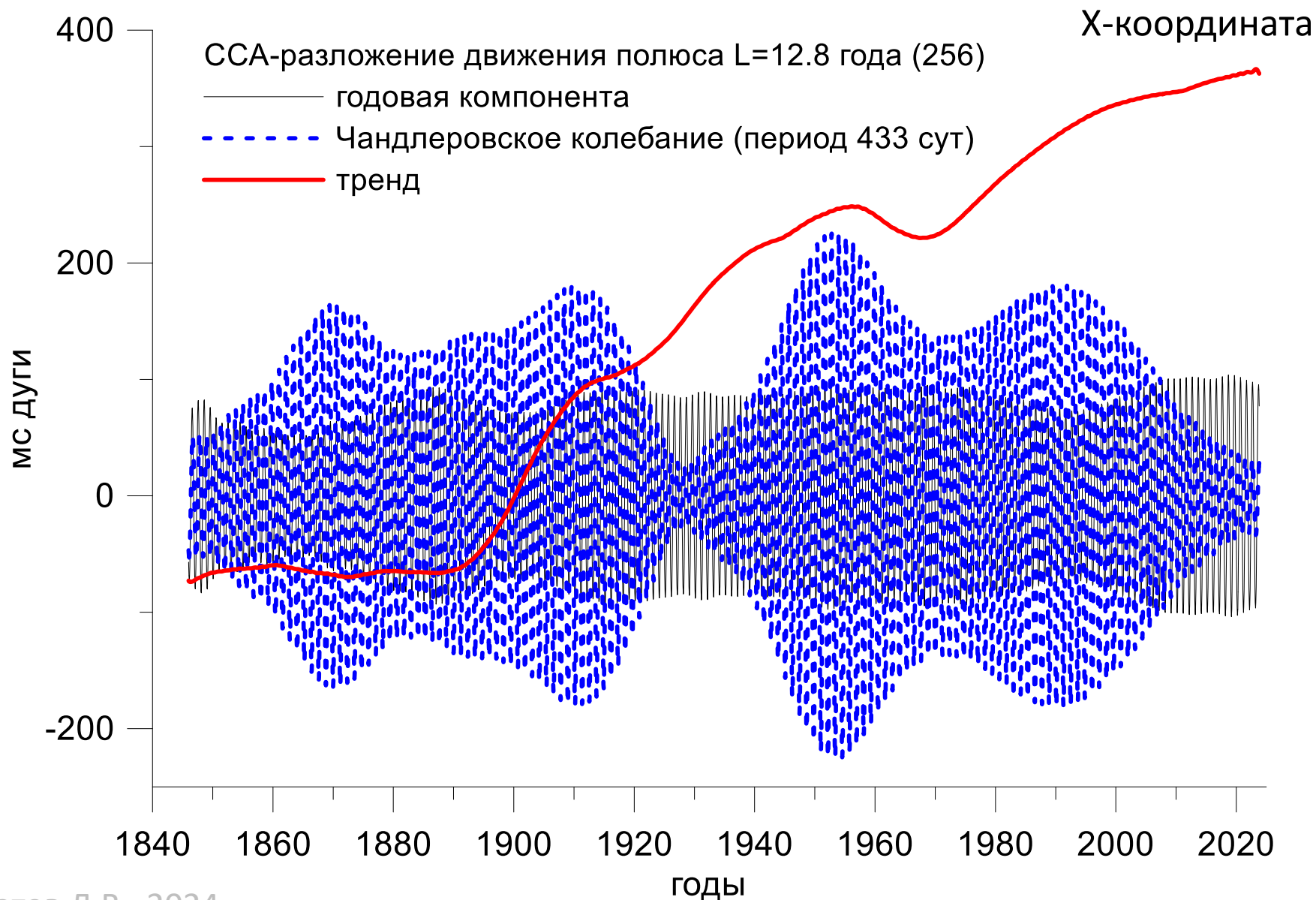
Геофизическое  
возбуждение

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

# Движение полюса с 1846 по 2024.6 из бюллетеня EOP C01



# Компоненты движения полюса из бюллетеня EOP C01

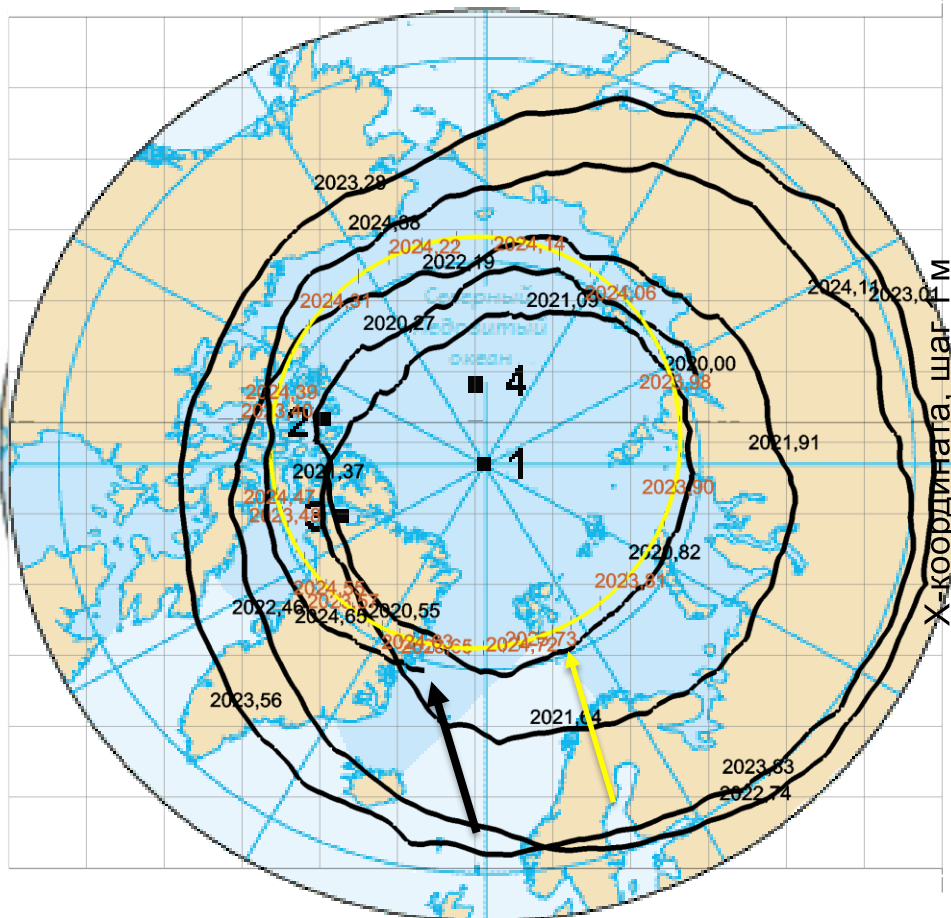


# Движение полюса с 2020 по 2024 из бюллетеня EOP C01

Движение полюса

- по данным EOP C01
- Чандлеровское колебание
- + + + ДП за вычетом годового колебания
- + + + годовое колебание

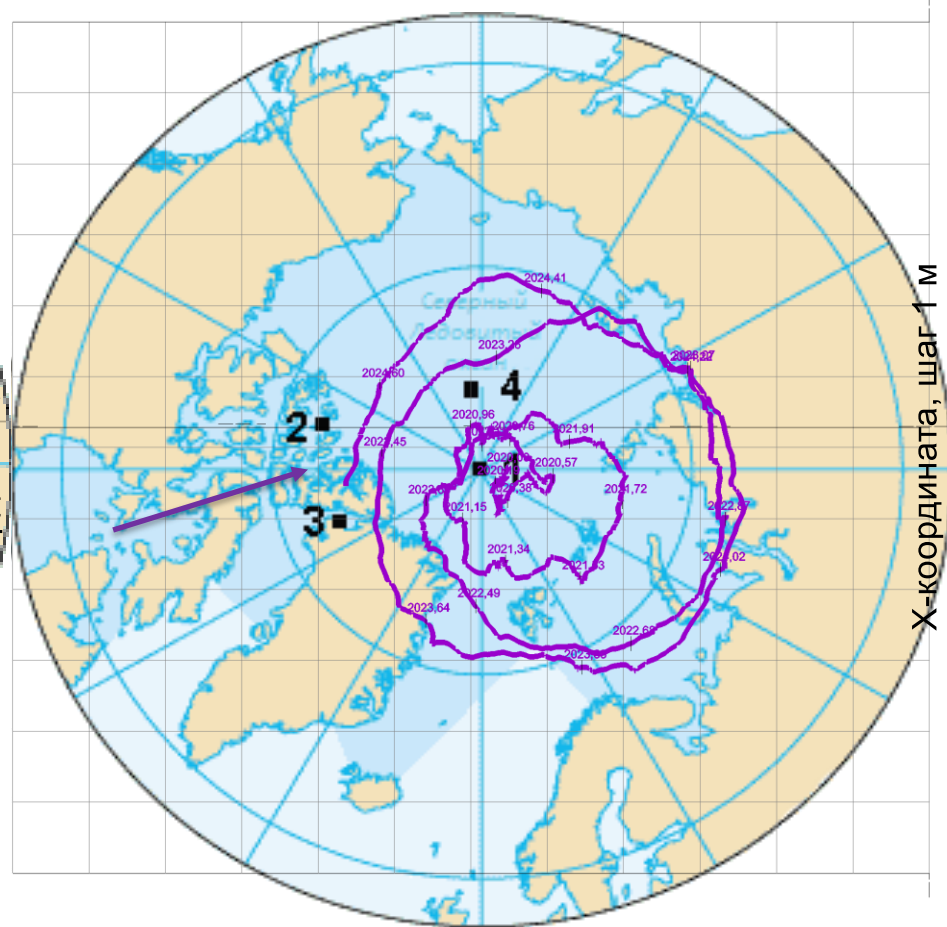
Y-координата, шаг 1 м



Движение полюса

- по данным EOP C01
- Чандлеровское колебание
- + + + ДП за вычетом годового колебания
- + + + годовое колебание

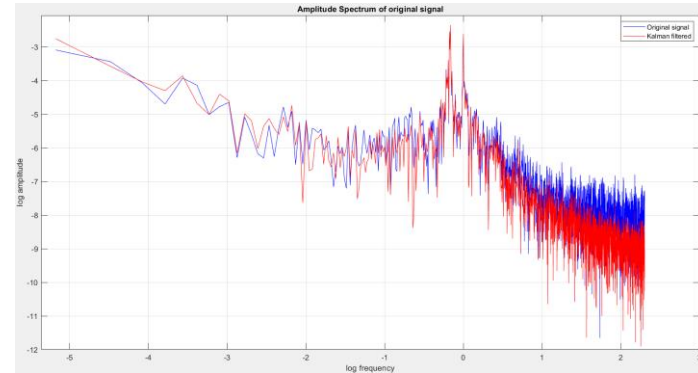
Y-координата, шаг 1 м



# Дополнительная фильтрация для выделения Чандлеровского колебания



Фильтруем наблюдения полюса с помощью фильтра Калмана, учитывая что дисперсия шума менялась за длительный период наблюдений.



Одновременно с этим выход фильтра Калмана пропускаем через уравнения Эйлера-Лиувилля (численно интегрируя). Резонансные свойства системы позволяют пропустить Чандлеровское колебание и подавить прочие составляющие. Ширину пропускания выбираем с помощью параметра  $Q=10$ .

$$W(p) = \frac{\sigma_c}{ip + \sigma_c} \quad \sigma_c = 2\pi f_c \left(1 + \frac{i}{2Q}\right), f_c - \text{Чандлеровская частота.}$$

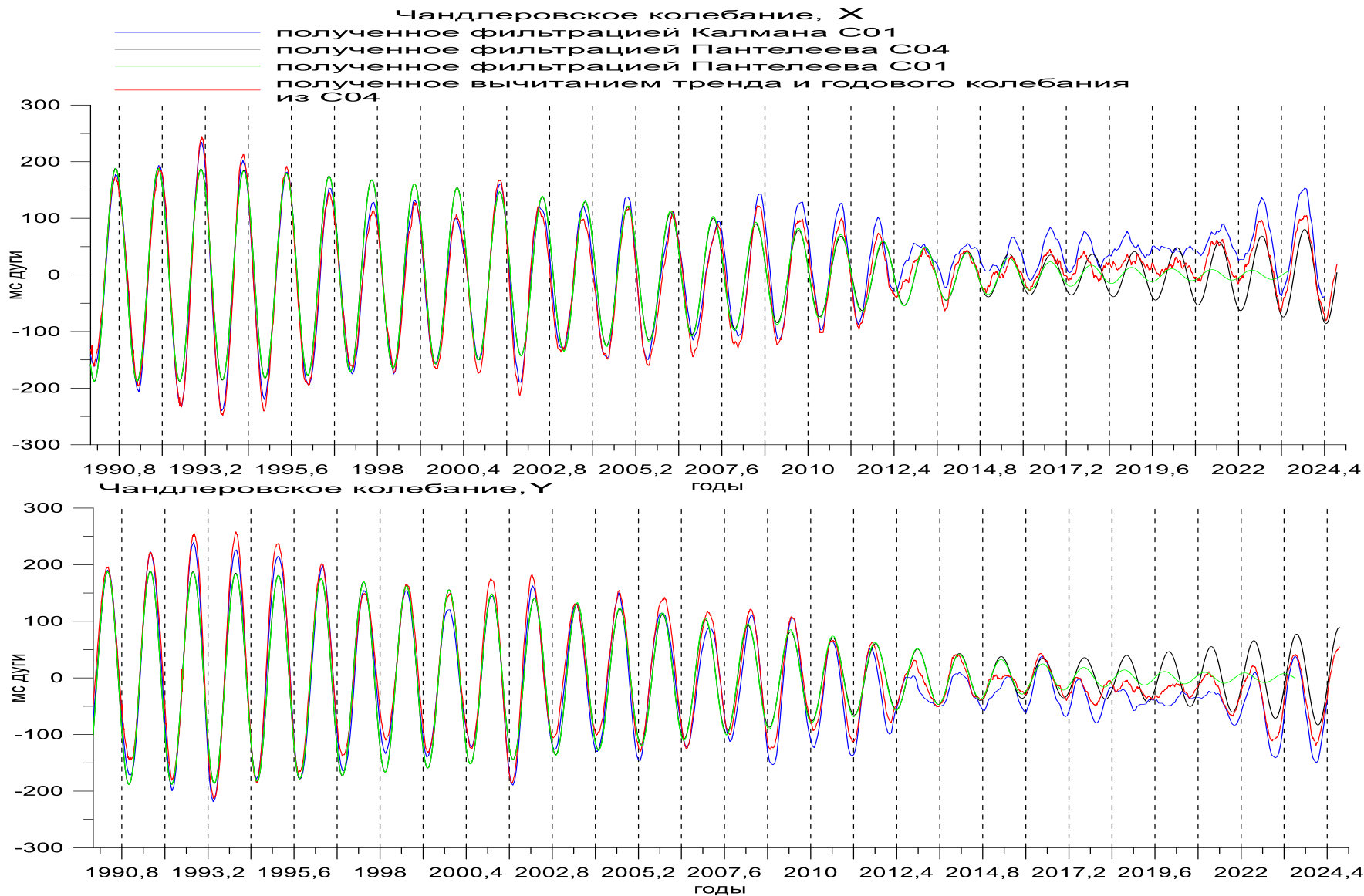


По завершении фильтрации еще раз пропускаем сигнал через уравнения Эйлера-Лиувилля (численно интегрируя), но уже в обратном времени, вводя комплексное сопряжение. Такая процедура корректирует (возвращает на место) фазовый сдвиг. Для чандлеровской частоты, к примеру, он составляет четверть периода ( $\pi/2$ ).

$$m(k) = \frac{\Delta t \tau}{2} \left( \varphi(k) + \varphi(k-1) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) + e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} m(k-1),$$

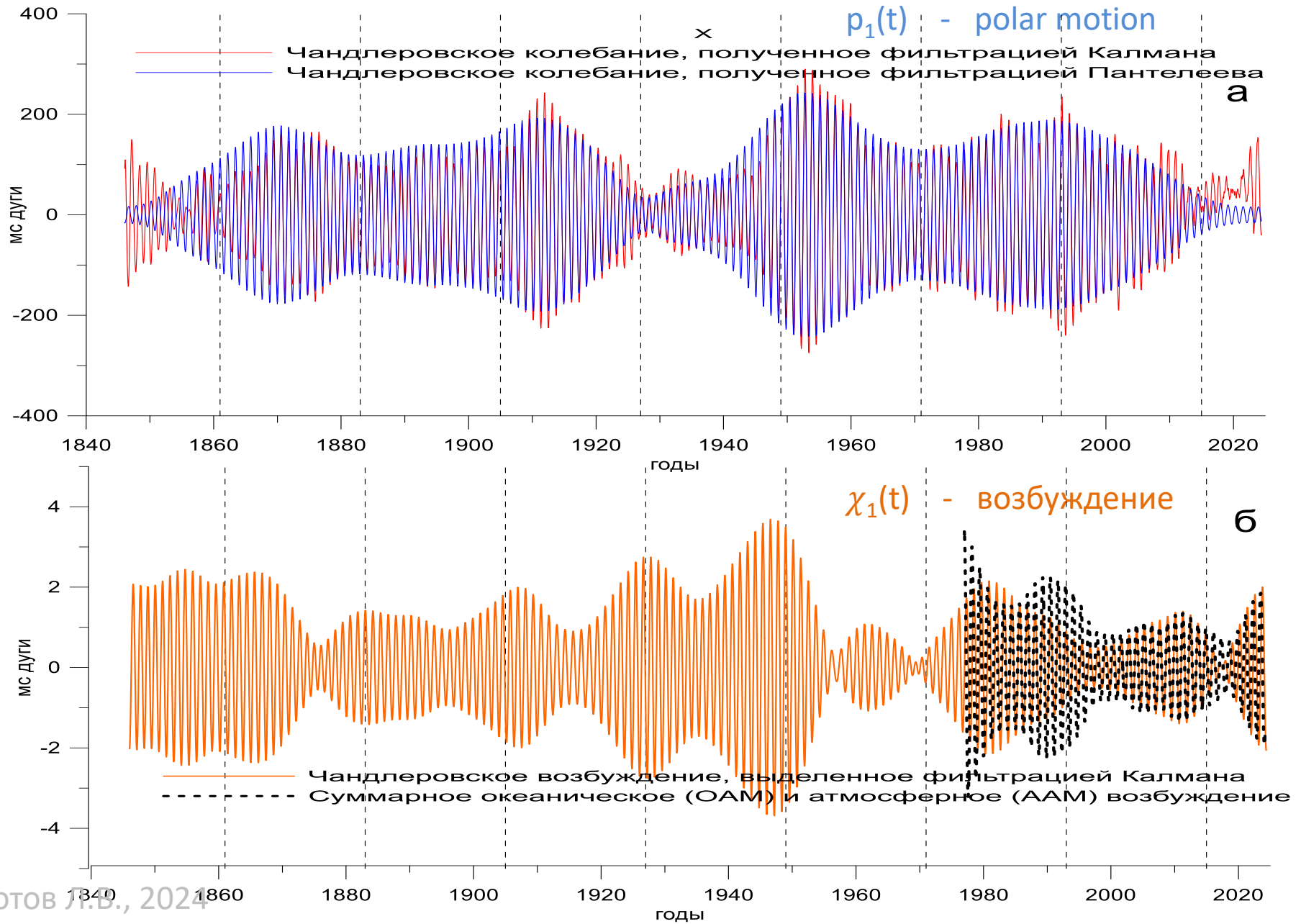
$$\text{где } \Delta t = t_{k+1} - t_k, \tau = \frac{1i}{\sigma_c}, \varphi - \text{вход, } m - \text{выход.}$$

# Чандлеровское колебание сегодня

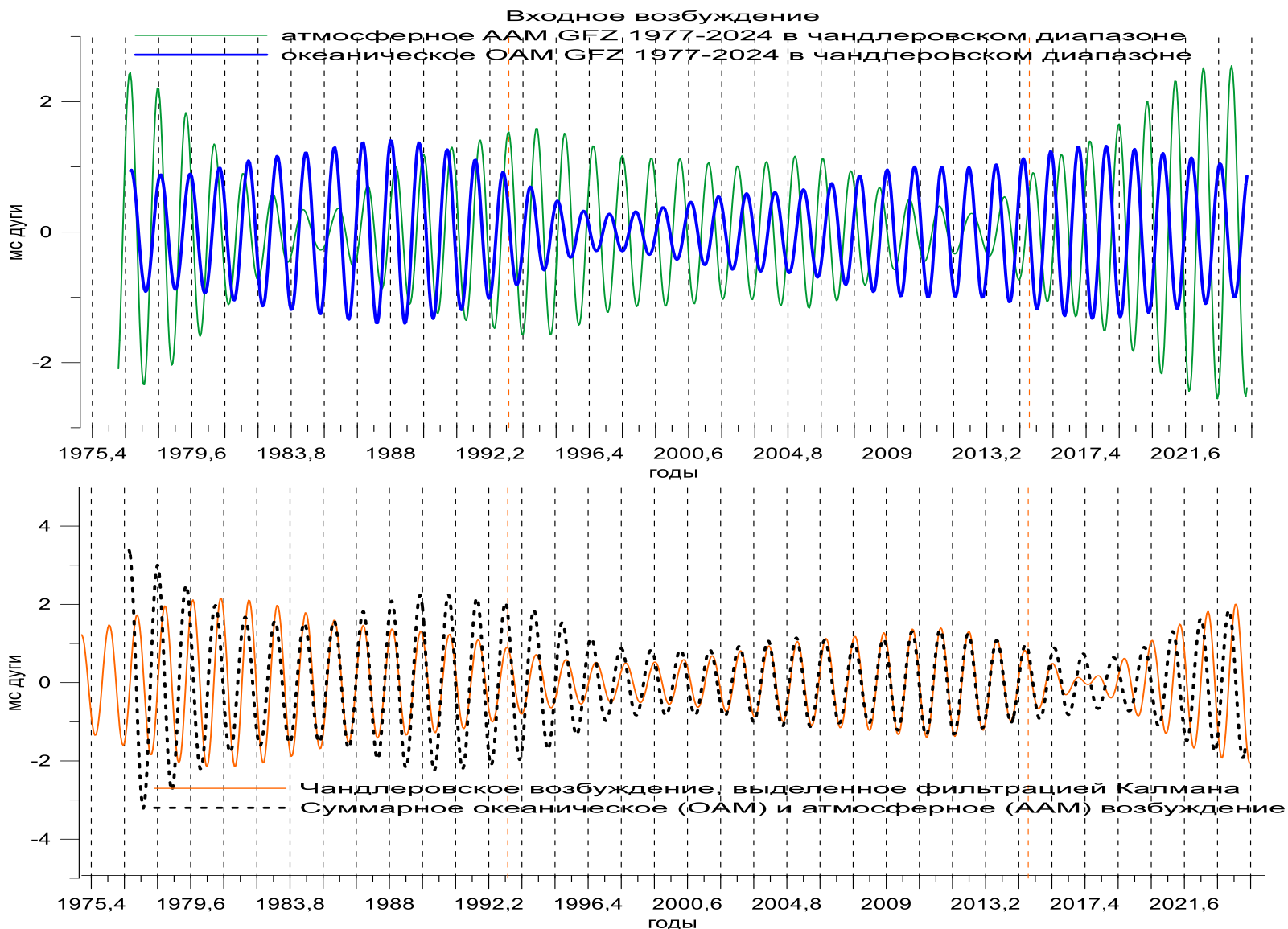




# Чандлеровское колебание $p$ и его возбуждение $\chi$



# Влияние атмосферы и океана на Чандлеровское колебание



Статья

## Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы

Л. В. Зотов, Н. С. Сидоренков<sup>2</sup>, К. Ж. Бизуар<sup>3</sup>

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<sup>1,2</sup>, Ming Fang<sup>1</sup>, Yong-Hong Zhou<sup>1,2</sup>, Xin-Hao Liao<sup>1,2</sup>

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](mailto:jiktm@eis.hokudai.ac.jp))

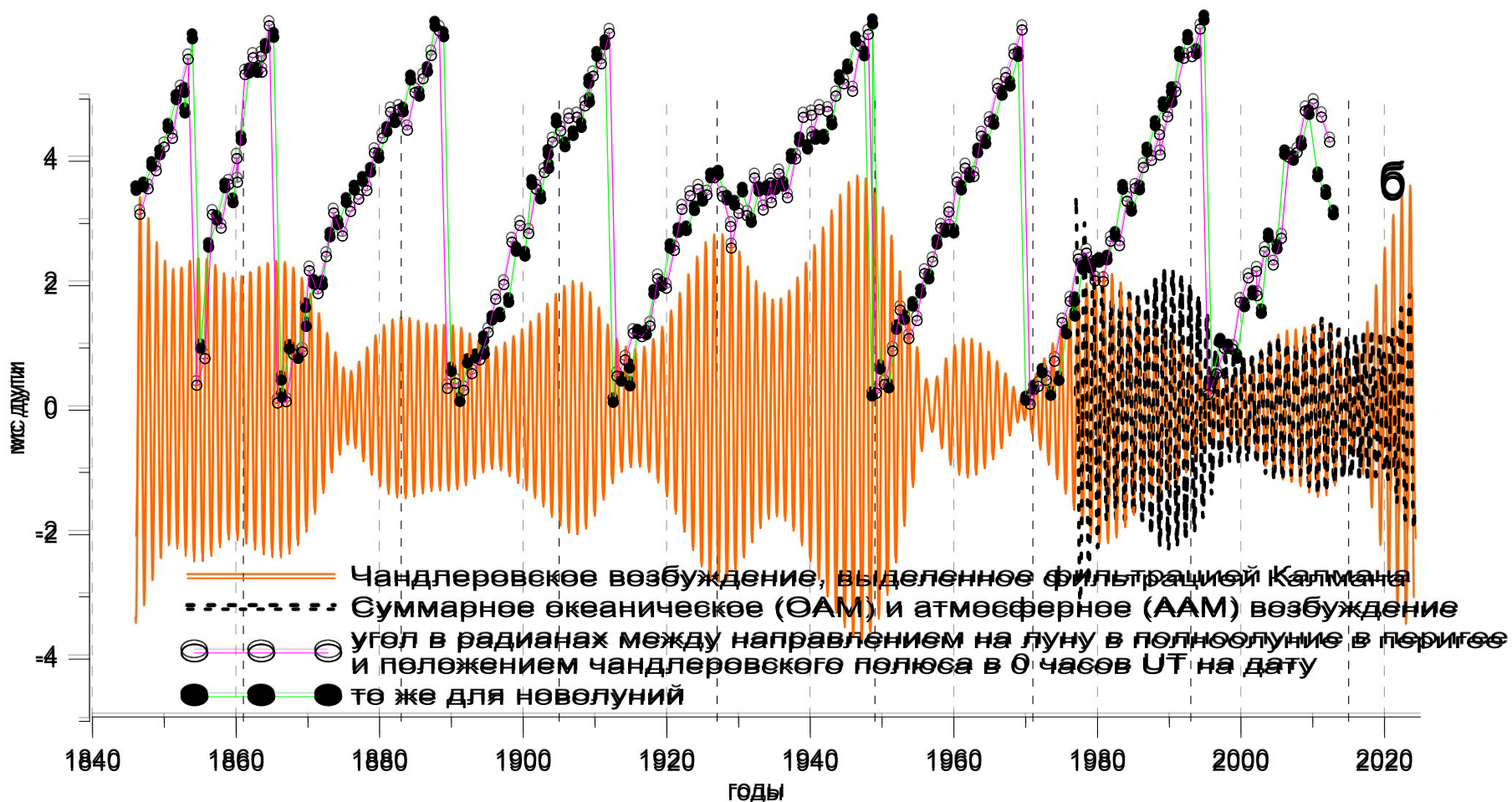
Hokkaido University: Hokkaido Daigaku <https://orcid.org/0000-0001-5210-9428>

Masato Furuya

Hokkaido University: Hokkaido Daigaku

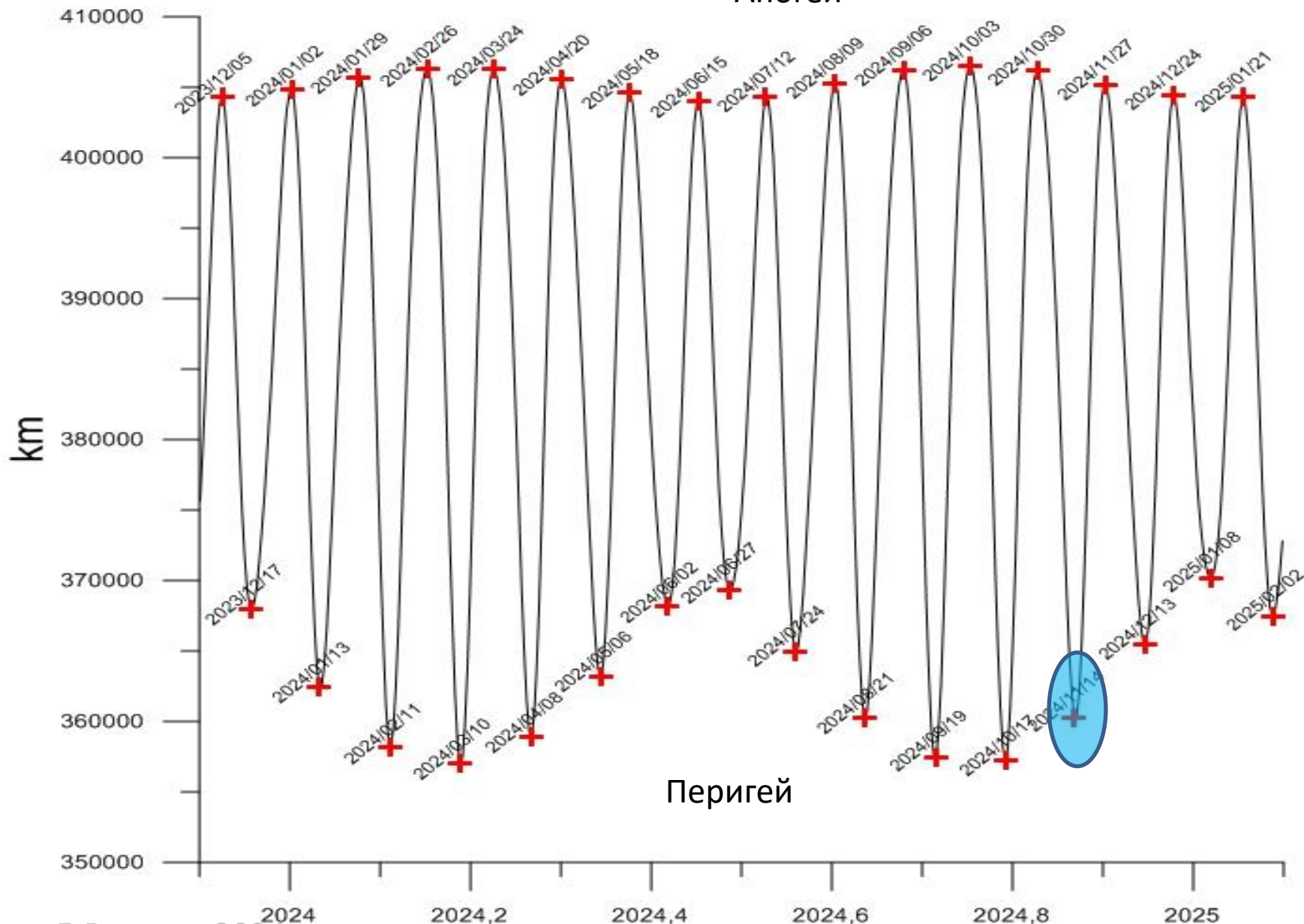
# Модуляции Чандлеровского возбуждения и 412-суточный цикл больших (перигейных) полнолуний

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



# Расстояние до Луны

Апогей

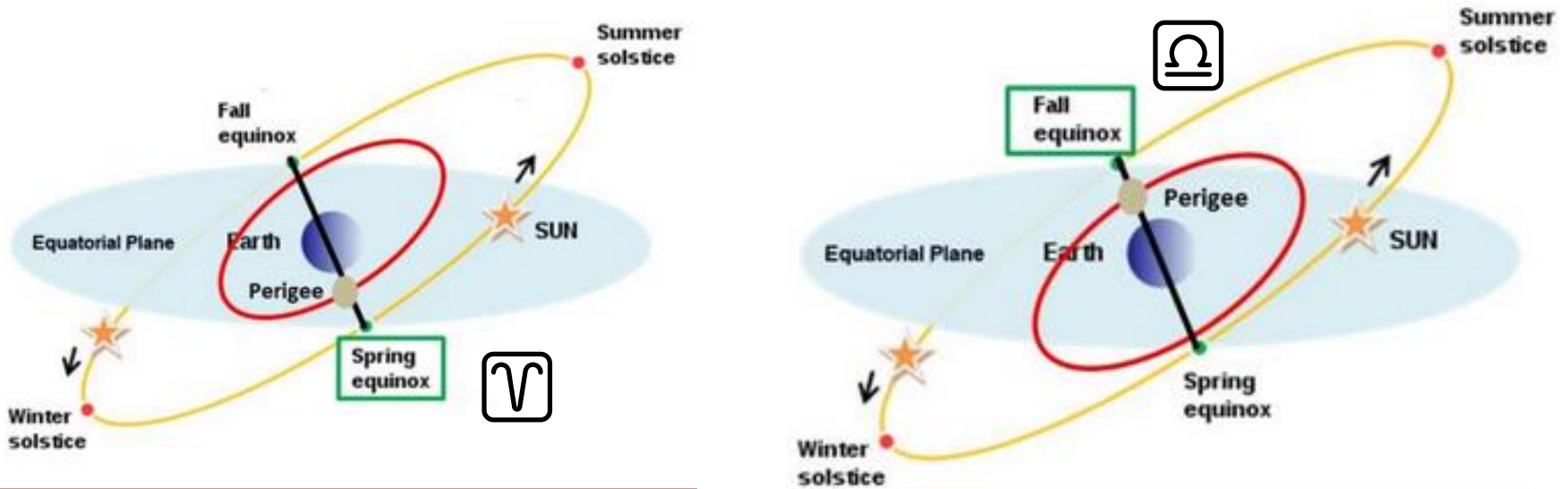


Перигей

# A Luni-Solar Connection to Weather and Climate

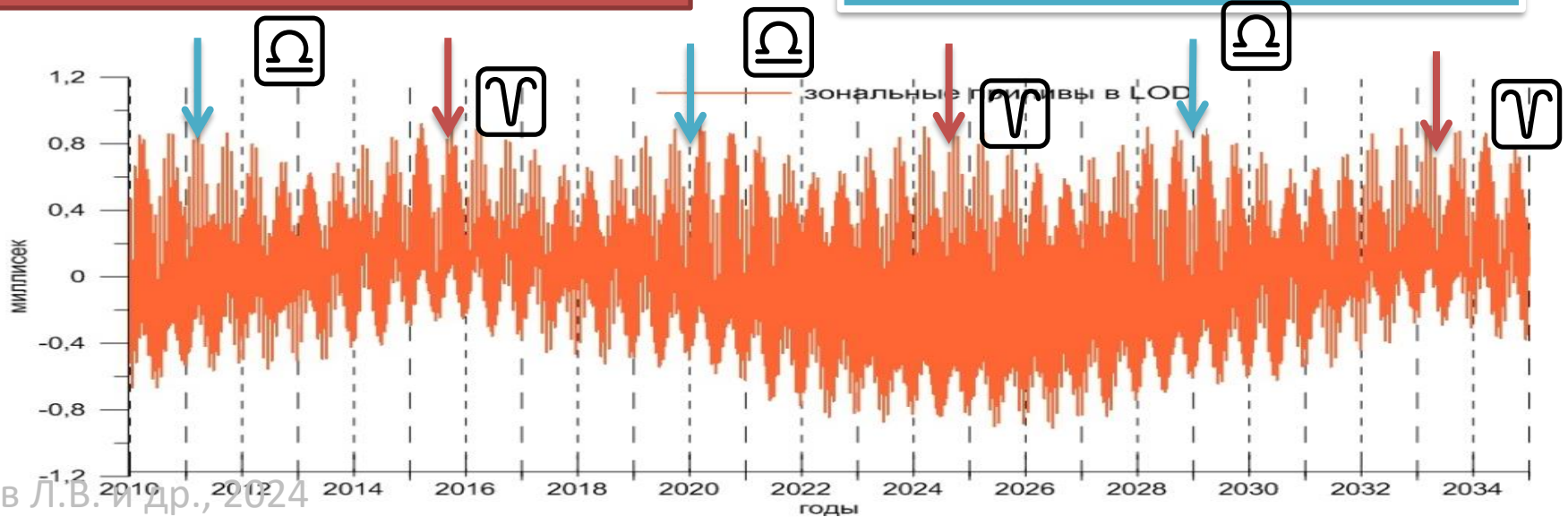
## II: Extreme Perigean New/Full Moons and El Niño Events

Ian R.G. Wilson\*<sup>1</sup> and Nikolay S. Sidorenkov<sup>2</sup>

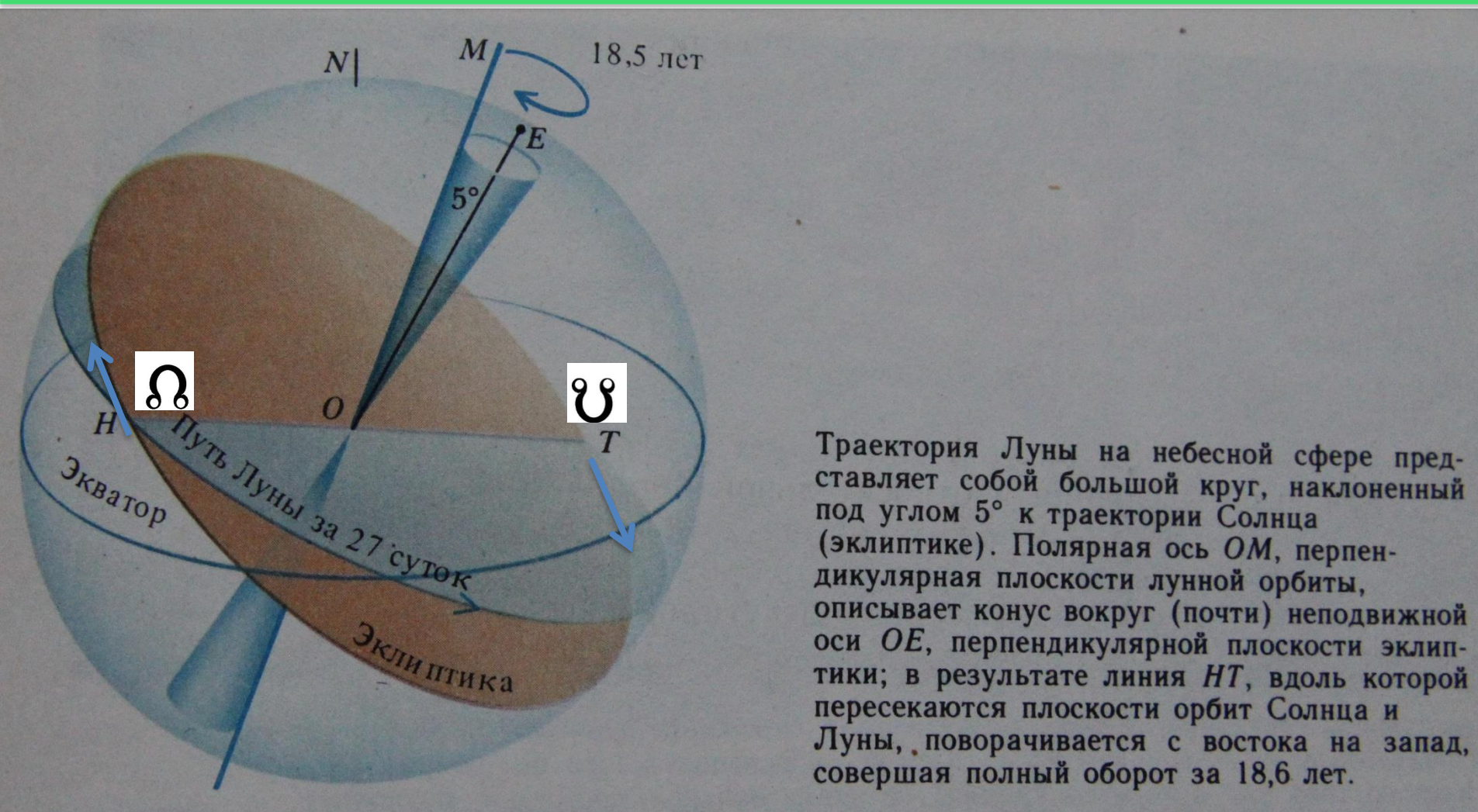


Перигей в весеннем равноденствии

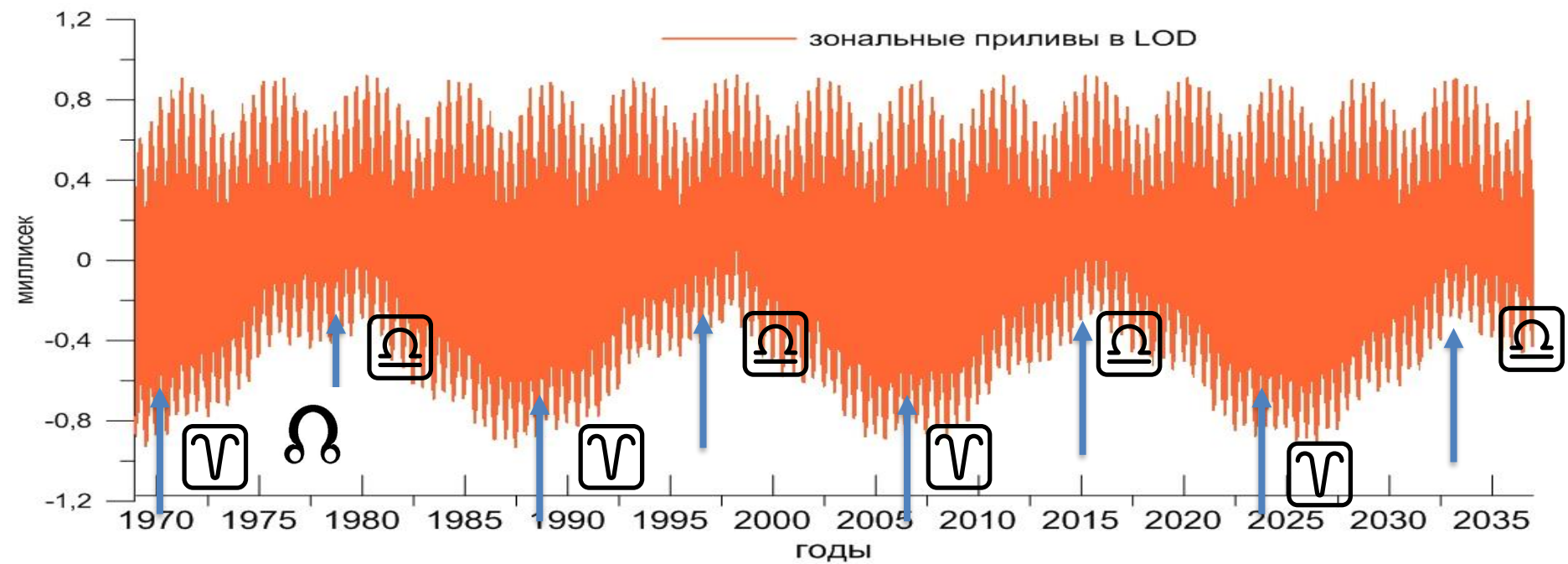
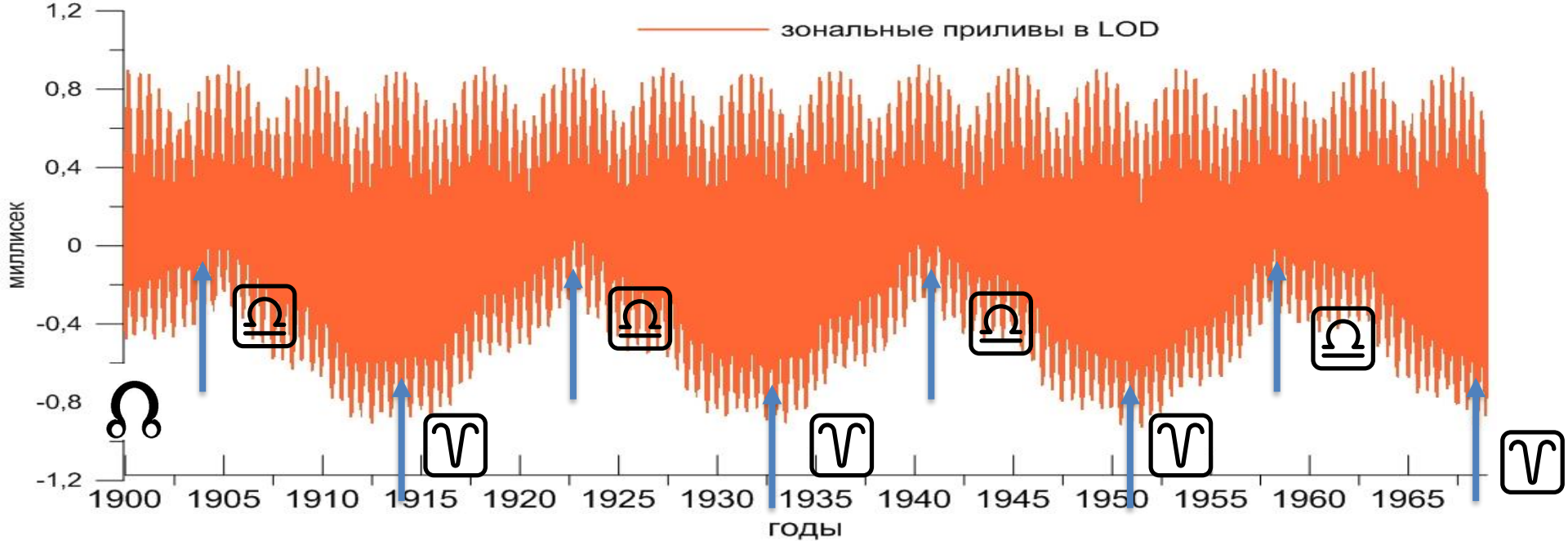
Перигей в осеннем равноденствии



# Узлы Лунной орбиты и 18-6-летняя прецессия

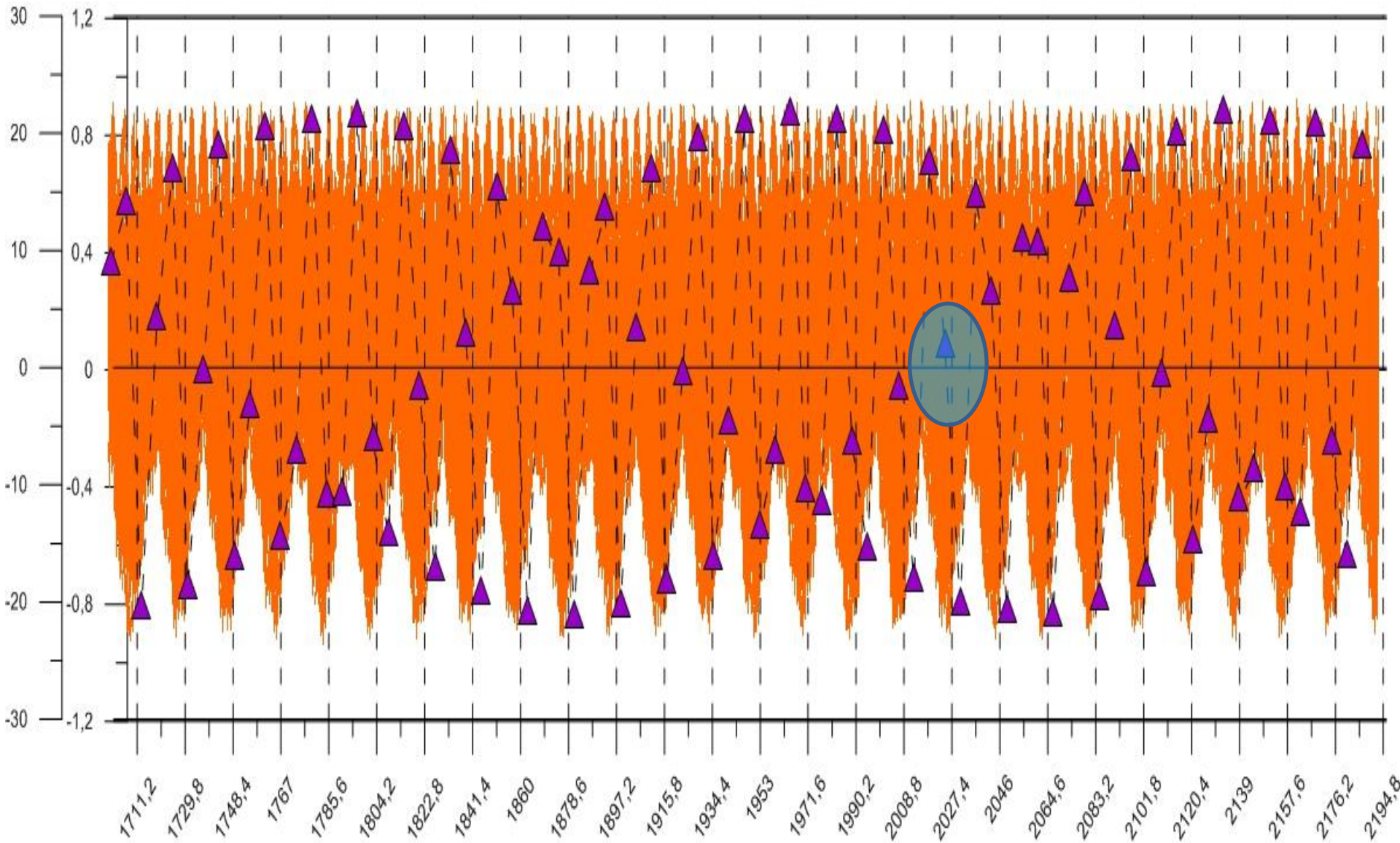


- точки пересечения лунной орбиты с эклиптикой

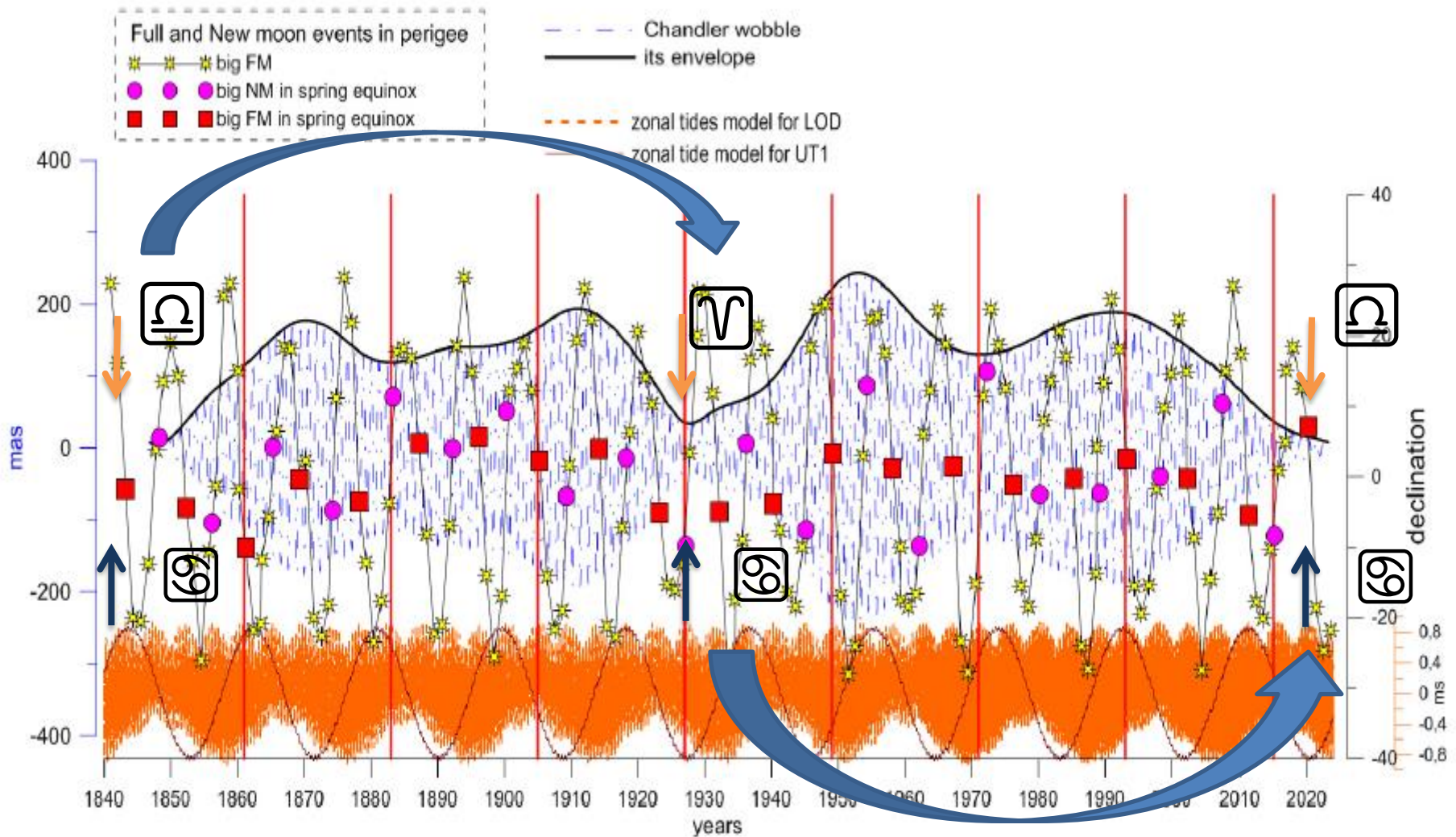





# Встречи перигея и узла каждые 6 лет и их склонения



# Причина раскачки и подавления Чандлеровского колебания



# Выводы

- Чандлеровское движение полюса исчезло в 2017-2021 и вновь возобновилось с изменением фазы на  $\pi$ , как было в 1930-е гг
- интегральный атмосферный и океанический моменты импульса лишь частично объясняют ход возбуждения и затухание ЧДП
- мы считаем, что движения линии узлов и апсид лунной орбиты из-за которых большие перигейные полнолуния происходят то в северном, то в южном полушариях неба, воздействуя на океан и атмосферу, сказываются на Чандлеровском колебании
- раз в 93 года перигей и узел встречаются на экваторе, 2024 – 
- в эти эпохи происходит переворот чандлеровского колебания,
- 90-летние колебания обнаруживаются также в скорости вращения Земли и Атлантической многолетней осцилляции  
изучение вращения Земли может быть ключом к пониманию разнообразных геофизических явлений

Спасибо за внимание!

