

УДК 523.3:551.2

DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

Оригинальная статья

## Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика

А.В. Мясников<sup>1</sup>, В.В. Стогний<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Россия, 119234, г. Москва, Университетский пр., 13, e-mail: andrey0405@mail.ru;

<sup>2</sup> Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: stogny\_vv@mail.ru

Статья поступила: 19.05.2025, доработана: 04.06.2025, принята к публикации: 06.06.2025

**Резюме: Актуальность работы.** Изучение короткопериодных компонент движения полюсов Земли и обоснование их возможной связи с геодинамическими процессами представляет собой актуальную проблему, определяющую подход к разработке моделей формирования полей напряженно-деформированного состояния земной коры сейсмоактивных регионов и характера их сейсмической активности. **Цель работы** – детальное изучение высокочастотных компонент движения полюсов Земли и обоснование их возможной связи с геодинамическими процессами. **Методы исследования.** Проведена цифровая фильтрация и спектральная обработка каталогов МСВЗ движения Северного полюса Земли с 1962 года (данные бюллетеня EOP14C04) и с 1900 года (данные бюллетеня EOP14C01) по 2024 год и анализ полученных материалов с выделением короткопериодных компонент движения Северного полюса Земли. **Результаты работы.** В спектрах вариаций движения Северного полюса Земли выделены короткопериодные компоненты. Рассмотрены возможные причины основных мод и обоснована их единая природа. Показано, что уровень высокочастотного «шума» в интервале частот, соответствующем периодам 100–30 суток, пропорционален величине отклонения полюса и сильно модулирован составляющей 6.3 года как огибающей высокочастотного диапазона исходного ряда с постоянным уменьшением его амплитуды за период с 1962 года (данные бюллетеня EOP14C04) до 2023 года и последующим ростом уровня высокочастотного «шума». Полученные материалы позволяют ставить в качестве проблемы исследование связи сейсмичности и ротационного режима Земли на примере отдельных сейсмоопасных регионов.

**Ключевые слова:** отклонение полюса, параметры вращения Земли, эллиптическая волна, деклинационная волна, чандлеровский период, годовой период, нутация ядра, спектральный анализ, геодинамика, землетрясение.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова и по госзаданию Геофизического института ВНЦ РАН, код: FMSM-2025-0025.

**Для цитирования:** Мясников А.В., Стогний В.В. Короткопериодные компоненты движения полюсов Земли и современная геодинамика. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 33–49. DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

Original paper

## Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics

A.V. Myasnikov<sup>1</sup>, V.V. Stogny<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,  
13 Universitetsky Pr., Moscow 119234, Russian Federation,  
e-mail: andrey0405@mail.ru;

<sup>2</sup>Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,  
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,  
e-mail: stogny\_vv@mail.ru

Received: 19.05.2025, revised: 04.06.2025, accepted: 06.06.2025

**Abstract: Relevance.** The study of short-period components of the Earth's polar motion and the substantiation of their possible connection with geodynamic processes is a pressing problem that determines the approach to the development of models for the formation of stress-strain state fields in the Earth's crust of seismically active regions and the nature of their seismic activity. **Aim.** A detailed study of high-frequency components of the Earth's pole motion and substantiation of their possible connection with geodynamic processes. **Research methods.** Digital filtering and spectral processing of the IERS catalogues of the Earth's North Pole motion from 1962 (EOP14C04 bulletin data) and from 1900 (EOP14C01 bulletin data) to 2024 were carried out, and the obtained materials were analyzed, identifying short-period components of the Earth's North Pole motion. **Results.** Short-period components are identified in the spectra of variations in the Earth's North Pole motion. Possible causes of the main modes are considered and their unified nature is substantiated. It is shown that the level of high-frequency "noise" in the frequency range corresponding to periods of 100-30 days is proportional to the magnitude of the pole deviation and is strongly modulated by the 6.3-year component as an envelope of the high-frequency range of the original series with a constant decrease in its amplitude over the period from 1962 (EOP14C04 bulletin data) to 2023 and a subsequent increase in the level of high-frequency "noise". The obtained materials allow us to pose as a problem the study of the relationship between seismicity and the rotational regime of the Earth using the example of individual seismically hazardous regions.

**Keywords:** polar deviation, Earth rotation parameters, elliptical wave, declination wave, Chandler period, annual period, core nutation, spectral analysis, geodynamics, earthquake.

**Acknowledgment:** *The study was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University and according to the state assignment of the Geophysical Institute of the VSC RAS, code: FMSM-2025-0025.*

**For citation:** Myasnikov A.V., Stogny V.V. Short-period components of the Earth's polar motion and modern geodynamics. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 33-49. DOI: 10.46698/VNC.2025.38.32.001

### Введение

Космические факторы определяли геологические процессы развития Земли как планеты на всем протяжении ее эволюции [Баренбаум, 2002; Куликова и др., 2005]. Наиболее длиннопериодными из доказанных к настоящему времени являются геологические процессы, обусловленные движением Солнечной системы вокруг ядра галактики, Галактический год, длительность которого оценивается в 180–200 млн

лет, обоснованные И.М. Суховым [Научное наследие ..., 1994].

Современные геодинамические процессы, определяющие сейсмическую активность Земли, также связаны с космическими факторами, взаимосвязь которых начинает изучаться [Алиев и др., 2023]. Среди короткопериодных вариаций, определяющих современную геодинамику, обычно рассматривают Чандлеровские колебания (длительность ~430 суток). Вместе с тем, короткопериодные процессы, вызывающие изменение ротационного режима Земли и, соответственно, отражающиеся в современной геодинамике, очень разнообразны и по причинам возникновения, и по их следствиям, что являлось основной целью проведенных исследований. Для горных регионов, где наиболее четко прослеживается связь геодинамических процессов с геоэкологической нагрузкой [Бурдзиева и др., 2024], такие исследования наиболее актуальны.

### Обзор и обоснование проблемы исследований

Хорошо известен факт, что на фоне векового дрейфа движения полюса существуют две основные периодические компоненты, вызванные разными причинами: 1) годовая компонента движения полюса (ГДП); 2) Чандлеровская компонента движения полюса (ЧДП) с периодом 414–440 суток. Происхождение годовой составляющей обусловлено в основном перемещением масс в атмосфере и в океанах. Сезонное перемещение воздушных (в первую очередь) и водных объемов обуславливает масштабное перераспределение масс на поверхности Земли с периодом равным тропическому году и природа ГДП понятна. Вторая компонента движения полюса, ЧДП, наоборот, вызывает многочисленные дискуссии и вопросы и, более того, невыясненной остается сама природа ее происхождения. Так, петербургский академик Леонард Эйлер в 1765 г., исследуя вращение твердого тела, теоретически вывел, что если оно отличается от идеального шара и его главные моменты инерции не равны между собой, то ось вращения будет перемещаться внутри тела, описывая узкий конус с соответствующим периодом вокруг оси наибольшего момента инерции.

Для фигуры Земли с определенными параметрами этот период составил 305 суток. Действительно, с самого начала широтных исследований движение полюса по поверхности объясняли теорией свободной нутации [Куликов, 1962]. Исходя из этого, было оценено значение динамического сжатия Земли  $H=1/305,51$ , которое оказалось отличным от величины  $H=1/427$ , определенной благодаря наблюдениям вынужденной нутации Земли под действием Луны и Солнца [Woolard, 1953]. Для объяснения различия оценок С.Ньюкомб [Newcomb, 1892] предложил рассматривать период  $T=305$  суток как период свободной нутации абсолютно твердой Земли, а период  $T=430$  суток, выявленных американским астрономом С.Чандлером (Seth Carlo Chandler) в 1891 г. и получивших название чандлеровских – как период свободной нутации деформируемой Земли. В работе [Крамер, Молоденский, 1961] было показано, что при изменении параметров твердости исследуемого тела меняется и его динамическое сжатие, то есть, различие между двумя значениями сжатия связано с процессом, при котором меняются свойства изучаемого объекта.

Перемещения оси вращения в структурно-неоднородном теле могут происходить не только при свободной нутации, но и под действием внешней силы. В качестве начальной модели достаточно рассмотреть общую структурную схему строения Земли, согласно которой Земля представляет собой эллипсоид вращения, со-

стоящий из твердой (упругой) оболочки толщиной 2900 км (земная кора и мантия) и массой  $4.080 \cdot 10^{24}$  кг. Ядро Земли при радиусе 3480 км имеет массу  $1.883 \cdot 10^{24}$  кг, в центре – твердое ядро радиуса 1217 км [Стогний, 2023]. По современным представлениям [Литасов, Шацкий, 2016], внешнее жидкое ядро имеет однородную структуру и дефицит плотности около 10% (по сравнению с плотностью  $Fe$ ), а внутреннее твердое ядро имеет сильно неоднородную структуру и дефицит плотности около 5%. По геомагнитным наблюдениям отмечается слабая рассогласованность вращения структур, при которой направление оси вращения оболочки и ядра различается на величину порядка  $10^{-5}$  рад. В результате решения обратной задачи магнитометрии установлено [Кочнев, 2023], что движение положительно слабо заряженной жидкости ядра, создаваемое вращением Земли и тормозящими гравитационными силами Луны и Солнца, обуславливает ток, генерирующий ее магнитное поле. Изменения в ядре, приводящие к изменениям положения оси вращения Земли, сопровождаются скачками земного магнитного поля [Вольвач и др., 2022].

В последующих моделях нутации и дрейфа движения полюса Земли необходимо учитывать также симметрию геодинамических систем Земли и, в частности, антисимметрию (антиподальность) рельефа и структуры Земли. Понятие антиподальности, введенное в 1960 г. Г.Н. Каттерфельдом и проявляющееся, прежде всего, в антиподальности Северного и Южного полушарий Земли, выражается в континентальности ее Северного и океаничности Южного полушарий [Павленкин, Межевов, 2009]. Сферически-несимметричное строение характерно не только для Земли, но и для других планет Солнечной системы, Венеры, Марса и Луны (в системе двойной планеты Земля-Луна) [Тараканов, 1999].

Механическая связь сфероида со структурой всей Земли характеризуется некоторым коэффициентом  $k$ , через который определяется собственная частота колебаний и через который можно пересчитать модуль внешней силы в перемещения сфероида. Смещения ядра повлекут за собой изменения положения центра масс Земли относительно внешней оболочки. Мгновенная ось вращения спроектирует на поверхность эти изменения, которые будут восприняты как движения полюса. Происходящие в то же время наклоны оболочки ведут к тому, что траектория движения центра масс воспроизводится на поверхности в переменном масштабе. В соответствии с этим изменимость широт следует рассматривать не как проявление свободной нутации, а как процесс, обусловленный вынужденными движениями внутреннего ядра, происходящими на фоне вынужденной нутации под действием приливных сил Луны, Солнца и планет.

По нашему мнению, ключом к изучению причин нутации Земли является детальное изучение высокочастотных компонент движения полюсов Земли и их связи с геодинамическими процессами.

### Методика и результаты исследований

В статье приведены все ссылки на используемые данные (бюллетени МСВЗ ЕОРС01 и ЕОР14С04), процедуры цифровой фильтрации и приемы обработки полученных сигналов на базе этих данных.

**Спектральный анализ.** В работе использованы данные бюллетеня ЕОР14С04 Международная Служба Вращения Земли (МСВЗ) отклонения Северного полюса в прямоугольных координатах  $X$  и  $Y$ , относительно Международного Условного Начала (МУН) с 1962 года по настоящее время. Мгновенный полюс перемещается по

земной поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли, т.е. против часовой стрелки. По этим данным был построен сигнал абсолютного отклонения полюса  $R$ , по которому проводилась дальнейшая обработка.

Результат спектрального анализа данного сигнала абсолютного отклонения полюса  $R$  в частотном диапазоне соответствующий периодам 10–10000 суток показан на рисунке 1а (в логарифмическом масштабе). Хорошо видно составляющие ГДП (период 365 суток) и ЧДП (средний период 433 суток за рассматриваемый интервал) и кратные им моды: 1 (период 217 суток), 2 (198 суток), 3 (144 суток), 4 (136 суток). Отметим, что, строго говоря, кратными являются только 1 и 3 моды относительно Чандлеровской составляющей, а моды 2 и 4 являются боковыми относительно 1 и 3 соответственно, и указывают на модуляцию этих мод [Отнес, Эноксон, 1982] с периодом 6.1–6.2 лет.

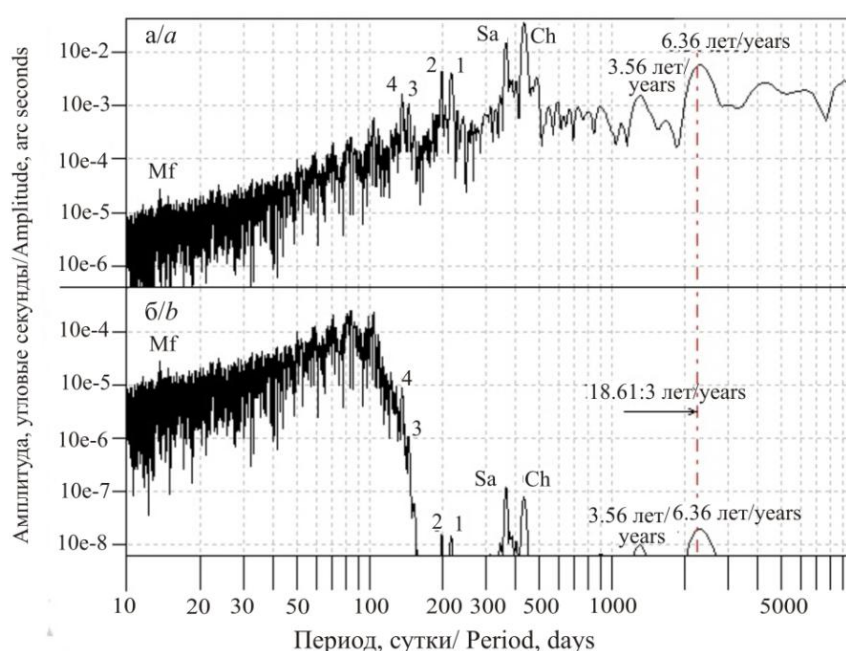


Рис. 1. Спектр отклонения Северного полюса в диапазоне 10–10000 суток: а – спектр абсолютного отклонения, б – спектр отклонения полюса с подавленными низкими частотами соответствующими периодам более 100 суток. Ch – период Чандлера (430 суток); Sa – годовой период; 1, 3 – кратные моды относительно периода Ch в порядке увеличения частоты; 2, 4 – боковые моды относительно 1, 3 соответственно; Mf – лунная приливная волна (13.66 суток). Вертикальная штрихпунктирная линия соответствует одной трети периода (18.61 лет / 3) движения лунных узлов 6.21 года /

Fig. 1. Spectrum of the North Pole deviation in the range of 10–10,000 days: a – spectrum of absolute deviation, b – spectrum of the pole deviation with suppressed low frequencies corresponding to periods longer than 100 days. Ch – Chandler period (430 days); Sa – annual period; 1, 3 – multiple modes relative to the Ch period in order of increasing frequency; 2, 4 – lateral modes relative to 1, 3, respectively; Mf – lunar tidal wave (13.66 days). The vertical dash-dotted line corresponds to one third of the period (18.61 years / 3) of the lunar node motion 6.21 years

Выполненный спектральный анализ дал возможность также выделить в сигнале отклонения полюса лунную приливную волну  $Mf$  (период 13.66 суток, деклинационная волна). Отношение «сигнал/шум» этой моды не превышает 2 единиц. Но, вместе с тем, приливную волну  $Mm$  (период 27.55 суток, эллиптическая волна) в результате спектрального анализа не удалось выделить на фоне шума.

**Вариация амплитуды лунных мод  $Mm$  и  $Mf$  и амплитуды огибающей в узком частотном диапазоне 100–30 суток.** На первом этапе работы была поставлена задача: определить вариацию параметров (амплитуды и фазы) приливной волны  $Mf$ , которая однозначно была выделена в ходе предварительного спектрального анализа, и параметры моды с периодом волны  $Mm$  (сама волна не обнаружена). Вариация параметров моды определенного периода производилась с помощью кросс-спектрального анализа по следующей методике.

В качестве опорной лунной приливной волны генерировалась обычная гармоника выбранного приливного периода с нулевой фазой и единичной амплитудой. Кросс-спектральный анализ совместной обработки сигнала  $R$  и сгенерированной гармоники позволил определить амплитуду сигнала и его фазу относительно этого опорного сигнала на определенной частоте. Выбирая, таким образом, ширину окна и длину шага, становится возможным проследить вариацию этих параметров на всем интервале наблюдений. В данной работе ширина окна составила 200 суток, шаг 5 суток. Следуя этой методике, были выделены вариации параметров мод с периодами, соответствующими лунным волнам  $Mf$  и  $Mm$  начиная с 1962 года. Было выяснено, что наиболее полную и дополнительную информацию несет не вариация параметров отдельных мод ( $Mf$ ,  $Mm$ ), а огибающая уровня сигнала, полученная в результате полосовой фильтрации в частотном диапазоне соответствующем периодам 100–30 суток.

Процедура цифровой фильтрации являлась основной в данной работе, приведем краткое описание. Полосовой фильтр строился в виде нерекурсивного импульсного фильтра с конечной областью отклика (ИКО) [Отнес, Эноксон, 1982]. Это вид симметричных фильтров, которые не имеют задержки фазы сигнала на выходе (нулевой фазовый угол). Параметры фильтра были подобраны в соответствии с методикой, разработанной в работе [Ormsby, 1961]. Диапазон области отклика фильтра 1000 суток, что обеспечивает высокие характеристики процедуры фильтрации. На рисунке 1б показан результат работы цифрового фильтра в режиме высокочастотной фильтрации с частотой среза соответствующей 100 суткам, где амплитуды ГДП и ЧДП исходного сигнала подавлены более чем в  $10^5$  раз.

На рисунке 2 приведен спектр мощности сигнала отклонения Северного полюса в линейном масштабе в диапазоне 10–20 суток. По результатам анализа были выделены еще две моды с известными периодами. Это мода  $Sz$  (14.76 суток, сизигия или полупериод синодического месяца) и мода  $Sd$  (13.60 суток, полупериод драконического месяца). В энергетическом смысле влияние Луны на этих частотах на движение полюса пренебрежимо мало.

На рисунке 3 показано движение Северного полюса за период 1962–2024 гг., на рисунке 3а – исходный ряд абсолютного движения по данным бюллетеня EOP14C04 MCB3, а на рисунке 3б серым цветом показан результат фильтрации исходного сигнала, черным цветом показана его огибающая, которая и формирует сигнал  $Rf$  (см. табл. 1). Важным моментом является вопрос о природе этого «шума», не есть ли он инструментальная погрешность определения координат ( $X$ ,  $Y$ ) движения полюса. На рисунке 3д показана огибающая, полученная при фильтрации исходного сигнала  $R$  высокочастотным фильтром с частотой среза соответствующей периоду 30 суток, формирует сигнал  $Rf2$  (см. табл. 1). Форма сигнала  $Rf2$  как огибающая уровня «шума» кардинально изменилась примерно в 1980, затем в 1983 годах.

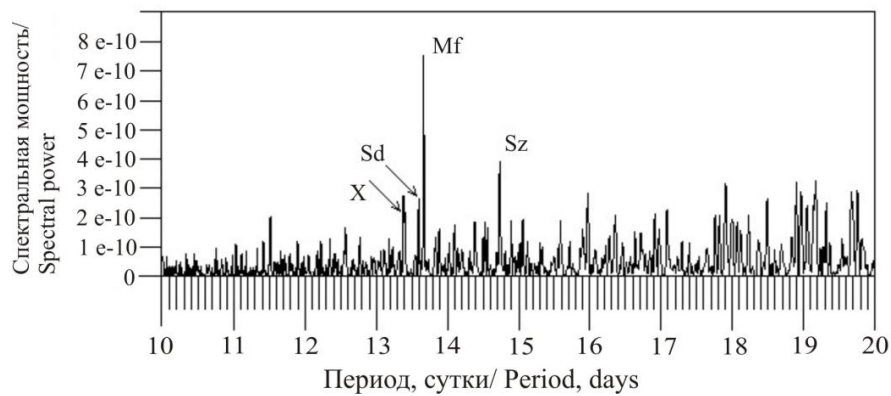


Рис. 2. Спектр мощности сигнала отклонения Северного полюса в диапазоне 10–20 суток. Обозначения выделенных мод: Mf – период лунной деклинационной приливной волны, Sz – период сизигий (14.76 суток) или полупериод синодического месяца, Sd – полупериод (13.60 суток) драконического месяца, X – неотожествленный период 13.38 суток /

Fig. 2. Power spectrum of the North Pole deviation signal in the range of 10–20 days. Designations of the selected modes: Mf – period of the lunar declination tidal wave, Sz – period of syzygies (14.76 days) or half-period of the synodic month, Sd – half-period (13.60 days) of the draconic month, X – unidentified period of 13.38 days

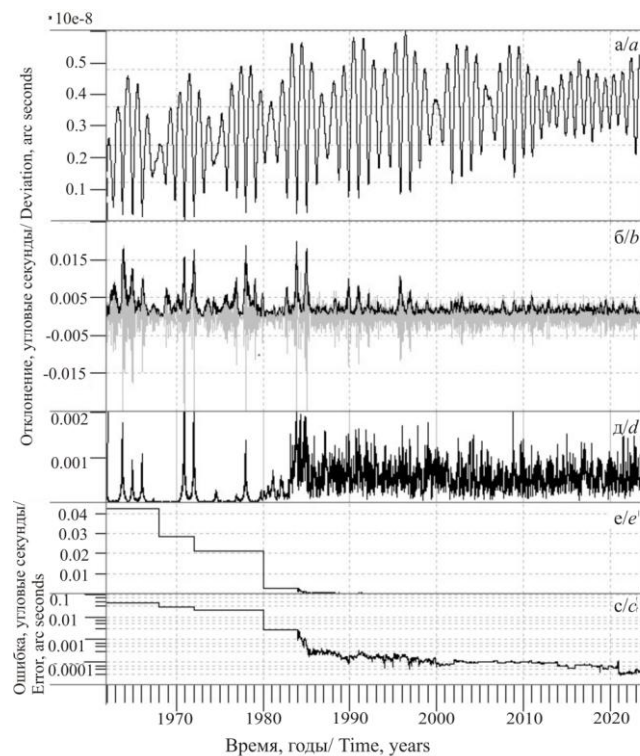


Рис. 3. Движение Северного полюса за период 1962–2024 гг.: а – исходный ряд абсолютного движения по данным бюллетеня EOP14C04 МСВЗ; б – серым цветом показан высокочастотный «шум» исходного ряда данных с частотой среза соответствующей периоду 100 суток, черным цветом показана огибающая этой высокочастотной компоненты; д – огибающая высокочастотного «шума» исходного ряда данных с частотой среза соответствующей периоду 30 суток; е, с – ошибка измерения ДПЗ в линейном и логарифмическом масштабах соответственно /

Fig. 3. The North Pole motion for the period 1962–2024: a – the original series of absolute motion based on the EOP14C04 IERS bulletin; b – the high-frequency “noise” of the original data series with a cutoff frequency corresponding to a period of 100 days is shown in gray, the envelope of this high-frequency component is shown in black; d – the envelope of the high-frequency “noise” of the original data series with a cutoff frequency corresponding to a period of 30 days; e, c – the error in measuring the DPD on linear and logarithmic scales, respectively

В таблице 1 вводятся обозначения и описания четырех сигналов. Во временной области сигнал  $R$  изображен на рисунке 3а. В первом приближении этот сигнал определяется двумя гармоническими процессами, ГДП и ЧДП, на долю которых приходится 93% всей энергии сигнала, на фоне векового дрейфа полюса [Woolard, 1953].

Таблица 1 / Table 1

**Описание сигналов полученных в процессе обработки /  
Description of signals received during processing**

№/ No.	Сигнал/ Signal	Описание / Description
1	R	Исходный сигнал, полученный как абсолютное отклонение полюса по ряду координат $X, Y$ движения полюса по данным бюллетеня EOP14C04 (1962–2024 годы) МСВЗ согласно $R=(X^2+Y^2)^{0.5}$ . См. рис. 3а / The original signal obtained as the absolute deviation of the pole along a series of $X, Y$ coordinates of the pole's motion according to the EOP14C04 bulletin (1962–2024) of the IERS according to $R=(X^2+Y^2)^{0.5}$ . See Fig. 3a
2	Rf	Огибающая уровня «шума» сигнала $R$ в полосе частот соответствующих периоду 30–100 суток. См. рис. 3б / The envelope of the “noise” level of the $R$ signal in the frequency band corresponding to the period of 30–100 days. See Fig. 3b
3	Rf2	Огибающая уровня «шума» сигнала $R$ в высокочастотной области с частотой среза соответствующей периоду 30 суток. См. рис. 3д / The envelope of the “noise” level of the $R$ signal in the high-frequency region with a cutoff frequency corresponding to a period of 30 days. See Fig. 3d
4	R2	Исходный сигнал. Абсолютное отклонение полюса $R2=(X^2+Y^2)^{0.5}$ по данным бюллетеня EOP14C01 (1900–2024 годы) МСВЗ / Original signal. Absolute pole deviation $R2=(X^2+Y^2)^{0.5}$ according to the EOP14C01 bulletin (1900–2024) of the International Society of Earth and Earth Studies

Данные бюллетеня EOP14C04 МСВЗ позволяют проследить увеличение точности (или уменьшение ошибки) измерения отклонения полюса  $X$  и  $Y$ , в первую очередь как результат технического прогресса. На рисунке 3е в логарифмическом масштабе показано как уменьшалась ошибка определения координат полюса, а на рисунке 3с показан график эволюции ошибки в линейном масштабе. Аналогичный результат отмечен в [Wang et al., 2016]. Действительно, в 80-е годы наблюдения с помощью оптических телескопов стали дополняться новыми методами измерений: с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (РДСБ), лазерной локации спутников (ЛЛС) и Луны (ЛЛЛ), системы глобального позиционирования (GPS) и т.д. В 1980-х годах произошло значительное увеличение точности также благодаря применению новых инструментов определения широты станции наблюдения.

Огибающая сигнала  $Rf2$  прекрасно иллюстрирует этот технический прогресс (рис. 3д). Так, уровень высокочастотного «шума»  $Rf2$ , собственно говоря, только появляется на записи после 80-х годов, и не уменьшился с ростом точности измерения координат полюса. То есть высокочастотный «шум» является не стохастическим шумом и не инструментальной ошибкой, а реальным сигналом, определяющим высокочастотные вариации координат полюса. Этот вывод мы можем распространить и на сигнал  $Rf$ . С другой стороны, на форму последнего практически не повлияло увеличение точности наблюдений. Более того, вариация уровня  $Rf$  имеет тенденцию к резкому увеличению, начиная с 2024 года.

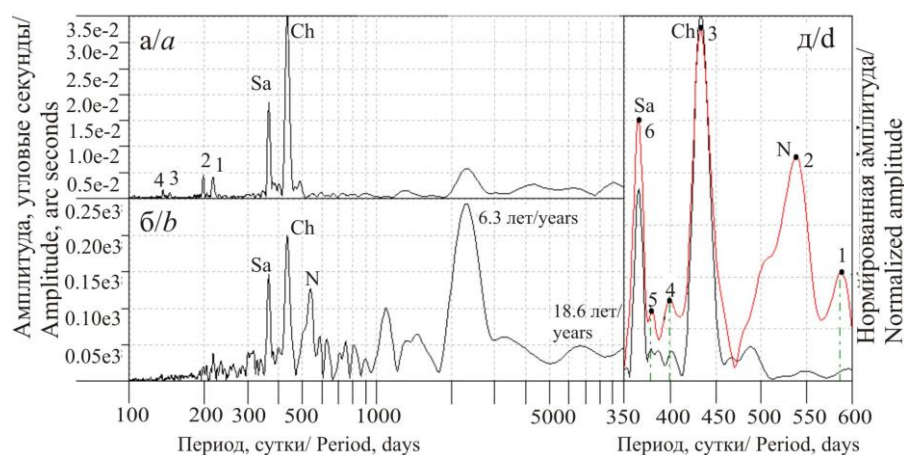


Рис. 4. Результаты спектрального анализа движения Северного полюса в диапазоне периодов 10–1000 суток: а – спектр амплитуды исходного сигнала; б – спектр амплитуды огибающей высокочастотного «шума»; д – совмещение спектров с нормированной амплитудой в диапазоне периодов 350–600 суток (линейный масштаб, черная линия – спектр исходного сигнала, красная линия – спектр огибающей уровня высокочастотного «шума»). Sa – годовая компонента ДПЗ, Ch – ЧДП, N – «новая» мода, 6.3 и 18.6 – моды с периодами 6.3 и 18.6 лет соответственно, 1, 4, 5 – прочие моды. Точки 1–6 показывают программно определенные максимумы спектральных линий. Штрихпунктирные вертикальные линии показывают период сближения Земли с Венерой (588.78 суток – максимум спектральной моды, точка 1 – 584 суток), точка 4 – с Юпитером (398.79–399), точка 5 – с Сатурном (379.15 – 378) /

Fig. 4. Results of spectral analysis of the North Pole motion in the period range of 10–1000 days: a – spectrum of the original signal amplitude; b – spectrum of the high-frequency “noise” envelope amplitude; d – superposition of spectra with normalized amplitude in the period range of 350–600 days (linear scale, black line – spectrum of the original signal, red line – spectrum of the high-frequency “noise” envelope). Sa – annual component of the DPD, Ch – NDP, N – “new” mode, 6.3 and 18.6 – modes with periods of 6.3 and 18.6 years, respectively, 1, 4, 5 – other modes. Points 1–6 show the software-defined maxima of the spectral lines. The dashed vertical lines show the period of the Earth’s approach to Venus (588.78 days – maximum of the spectral mode, point 1 – 584 days), point 4 – with Jupiter (398.79–399), point 5 – with Saturn (379.15 – 378)

**Спектральный анализ вариации амплитуды сигнала  $R_f$ .** На рисунке 4 приведены результаты спектрального анализа движения Северного полюса в диапазоне периодов 10–1000 суток (рис. 4а,б в логарифмическом масштабе) и в диапазоне периодов 350–600 суток (рис. 4д в линейном масштабе). Анализ спектра вариаций сигнала  $R_f$  позволил обосновать присутствие мод, совпадающих с периодами основных составляющих отклонения полюса: годовой период Sa и чандлеровский период движения полюса Ch. На рисунке 4д в спектре огибающей  $R_f$  появилась новая мода (обозначена символом «N») период которой составляет  $T_N=538$  суток. Значение этого периода соответствует второй боковой полосе при условии модуляции амплитуды чандлеровской моды циклическим процессом с периодом  $T$  равным  $1/3$  периода движения лунных узлов (18.61 года), что составляет 6.2 года. Наиболее убедительным будет результат, если показать это по отношению к другой боковой полосе, а именно годовой составляющей ГДП ( $T_{Sa}=365.24$  суток), период которой стабилен. Действительно,  $1/(T/2)=1/T_N-1/T_{Sa}$ , откуда следует, что  $T=6.21$  года. На рисунке 4а схематично показано расположение боковых полос при амплитудной модуляции с периодом  $T$  основной центральной моды на частотной оси (порядок расположения мод зеркально отобразится). В этом случае две полосы с соответствующими частотами ( $1/365$  и  $1/538$ ) расположились бы симметрично относительно моды Чандлера ( $1/433$ ).

## Обсуждение результатов

Земля это сложная механическая система взаимодействующих между собой различных геосфер, в которой ярко проявляются ее нелинейные свойства. Отклонение полюса Земли сопровождается по результатам данного исследования высокочастотным «шумом», но не как стохастическим процессом, а вполне определенным сигналом, уровень которого, в первом приближении, пропорционален величине этого отклонения. В результате обработки и анализа был выбран частотный интервал, соответствующий периодам 100–30 суток, в котором формировался сигнал  $R_f$ . Во-первых, в этом интервале, на форме огибающей «шума», не отразились те изменения в точности измерений координат движения полюса, которые произошли с начала 80-х годов (см. рис. 3). И самое главное, этот интервал имеет некую самоподобную структуру относительно исходного сигнала. Спектр полученной огибающей «шума» содержит уже 4 основных моды. Это годовая и чандлеровская составляющие, мода 6.3 года, энергетический уровень которой кратно вырос, и новая мода с периодом 538.14 суток. Эта мода отсутствует в спектре исходного сигнала  $R$ , и обнаруживается в спектре сигнала  $R_f$ , где занимает вполне определенное положение в частотной области. В частотном диапазоне она стоит ровно на том месте, где должна находиться боковая полоса при условии амплитудной модуляции амплитуды чандлеровской составляющей одну треть периода движения лунных узлов (18.612 лет) и на частотном расстоянии от годовой компоненты движения полюса ГДП равным соответствующим двум периодам по 6.2 года. В данном случае основной вывод заключается в следующем. Существует одна осциллирующая система с чандлеровским периодом колебаний. Амплитуда колебаний этого осциллятора модулируется циклическим процессом (движением Луны) с периодом одной трети периода лунных узлов. В результате в спектре возникают две боковые моды относительно чандлеровской компоненты.

В случае точного значения периода модуляции (6.21 года), левая боковая полоса (в соответствии с рис. 4) должна иметь период в 363.6 суток (период Чандлера принимаем 433 суток), который близок к годовому периоду Земли. Следовательно, такое обращение (с периодом 363.6 суток) должно синхронизоваться с обращением Земли, что и приводит к годовой компоненте с периодом 365 суток. Динамическая система приходит к своему устойчивому состоянию, соответствующему минимуму потенциальной энергии. В этом случае, сезонному движению масс на поверхности Земли отводится роль триггера, но не определяющего процесса годового движения полюса. Заметим, что этот вывод не распространяется на годовую составляющую вариации скорости вращения Земли.

Особое значение в этой системе имеет наличие ядра Земли: во-первых, оси вращения мантии и ядра слегка смещены и возможно существует вращение анизотропного ядра относительно мантии со скоростью порядка 0.5–1.0 градус/год, во-вторых, нельзя исключить поступательных колебаний внутреннего ядра за счет его отрицательной плавучести.

Обратимся к кратным модам 1 и 3 чандлеровской компоненты (433 суток) (см. рис. 1), точные значения (вычислены программно как точка максимума соответствующего пика в частотной области спектра) которых равны 217.1322 и 144.8641 суток соответственно. Кратные моды по отношению к годовой компоненте движения полюса в спектре отсутствуют. Моды 2 и 4, период которых 198.21 и

136.0 суток, не кратные периоду годовой компоненты (365.24 суток). Но если рассматривать их как боковые полосы по отношению к модам 1 и 3, то они образуют модуляцию с периодом 6.2 и 6.1 года соответственно. Здесь боковые моды не «скачываются» к неким устойчивым значениям периода, как в случае с годовой компонентой, и модуляция точно совпадает с 1/3 периода лунных узлов.

Годовая и Чандлеровская компоненты являются связанными колебаниями одной природы [Мясников, 2024], и возбуждение одной приводит к подавлению другой. Подобные параметрические резонансы очень часто встречаются в Солнечной системе. В данном случае мы имеем резонанс как отношение простых чисел 1:3. Причем в спектре огибающей «шума» (сигнал  $Rf$ ) в явном виде присутствует и сама мода с периодом 18.61 года (см. рис. 4б). Период лунных узлов, при определенных предварительных преобразованиях был обнаружен и в исходных данных движения полюса ( $X$ ,  $Y$ ) в работе [Перепелкин и др., 2022]. На рисунке 4д, где приведены совмещенные нормированные амплитудные спектры исходного сигнала  $R$  и сигнала  $Rf$  в частотном диапазоне соответствующем периодам 350–600 суток, жирные точки 1–5 показывают максимальные значения всех мод, периоды которых определены (вычислены программно) и показаны в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Моды Чандлера, связанные с периодами сближения Земли с Венерой, Юпитером и Сатурном / Chandler modes associated with periods of approach of the Earth to Venus, Jupiter and Saturn**

Точки /Points	1	2	3	4	5	6
Название /Name	Венера/ Venus	Новая Мода/ New Mode	Мода Чандлера/ Chandler's Mode	Юпитер/ Jupiter	Сатурн/ Saturn	Годовая Компонента/ Annual Component
Период (сутки) Вычисленный / Period (day) calculated	588.78	538.14	412–440 (см. рис.5)/ (see Fig.5)	398.78	378.55	365.31
Период (сутки) Известный / Period (day) known	584	–	433.31	399	378	365.24

Кроме периодов движения полюса (в табл. 2 выделены жирным шрифтом) появились еще 3 моды (рис. 4д), которые достаточно точно совпадают с периодами сближения Земли с Венерой, Юпитером и Сатурном. Период сближения с Марсом составляет 780 суток. На спектре рисунка 4б отмечена мода 804 суток, что может приблизительно соответствовать периоду сближения с Марсом.

Основной результат, который обсуждался в предыдущем разделе, связан с тем обстоятельством, что колебательное движение полюса определяется одной осциллирующей системой с переменными параметрами, что, в свою очередь, обуславливает единую природу годовой и чандлеровой составляющих. Подобные идеи, как системы связанных осцилляторов, уже рассматривались в [Kurbasova et al., 2003]. Приведем еще один результат, который является следствием сделанных выше выводов.

Воспользуемся, в этот раз, данными бюллетеня ЕОР14С01 Международная Служба Вращения Земли (МСВЗ) отклонения Северного полюса начиная с 1900 года по настоящее время. Сформируем сигнал  $R2$  подобным выше описанным образом (Формирование сигнала  $R$ , см. табл. 1). С помощью сконструированного импульсного полосового фильтра (описание процедуры фильтрации см. выше) выделим три составляющих: годовая компонента, чандлеровская компонента и мода с периодом 6.3 года.

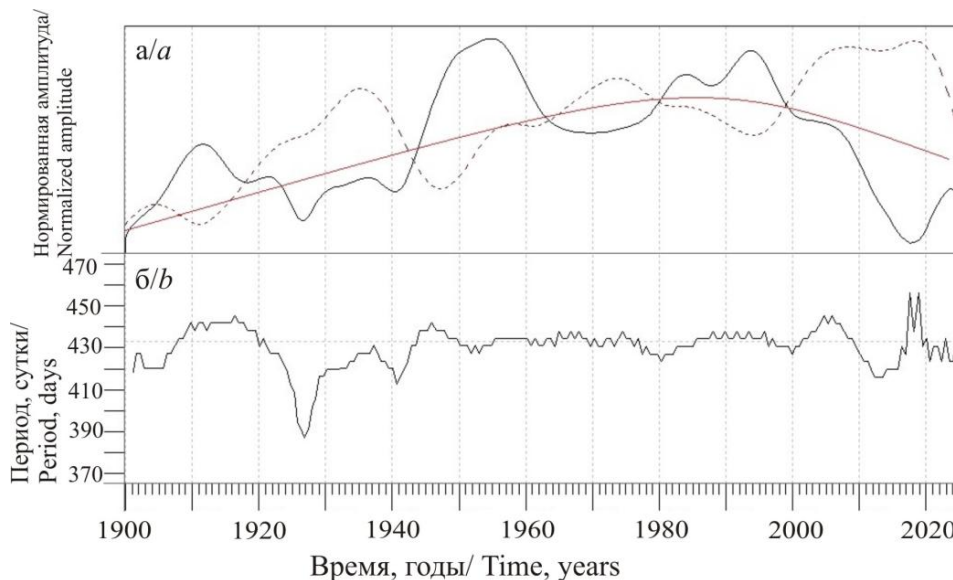


Рис. 5. Вариации ЧКП в 1900–2024 гг.: а – огибающая вариации амплитуды (сплошная линия – огибающая вариации амплитуды ЧКП, штриховая линия – огибающая вариации амплитуды годовой составляющей, красная линия – это маркер, средняя линия для более наглядного сравнения этих кривых); б – вариация периода колебаний ЧКП /

Fig. 5. Variations of the NCP in 1900–2024: a – envelope of the amplitude variation (solid line – envelope of the NCP amplitude variation, dashed line – envelope of the amplitude variation of the annual component, red line – marker, middle line for more visual comparison of these curves); b – variation of the period of NCP oscillations

На рисунке 5а показан результат фильтрации сигнала  $R2$  и выделены вариации нормированных амплитуд ЧДП (черная сплошная линия) и составляющей ГДП (пунктирная линия). Плавная красная линия на рисунке 5а показывает некий условный уровень, относительно которого компоненты ЧДП и ГДП меняются в противофазе. Это убедительно доказывает, что увеличение амплитуды одной компоненты совпадает с уменьшением другой, или другими словами происходит перераспределение энергии колебаний между модами ЧДП и ГДП. Если остаться на старых позициях, то вряд ли это можно объяснить тем, что годовая компонента вызвана сезонным перераспределением масс на поверхности Земли (и почему тогда вообще

должна меняться амплитуда в таких широких пределах?). Если годовая компонента строго синхронизируется орбитальным периодом Земли, то период ЧДП меняется в диапазоне 410–440 суток. Резкий скачок в 1916–1918 годах и в 2018 году (см. рис. 5б) связан не с изменением периода, а с еще не объясненной перестройкой фазы, которая всегда происходит, когда амплитуда ЧДП достигает своих минимальных значений.

Аналогичным образом ведет себя мода 6.3 года, вариация амплитуды которой показана на рисунке 6а (сплошная линия) и периода 6.2 года (рис. 6б). С одной стороны мы видим, что в настоящую эпоху, в отличие от первой половины рассматриваемого периода наблюдений, энергия этой моды резко упала (условный уровень на рис. 5а, красная линия). Перестройка фазы этой моды происходила в период 1930–1940 годов и начинается в настоящее время. Это снова приведет к росту амплитуды (энергии) данной компоненты и спаду общего уровня амплитуд годовой и чандлеровской компонент, что собственно можно уже наблюдать в настоящую эпоху (см. рис. 5а).

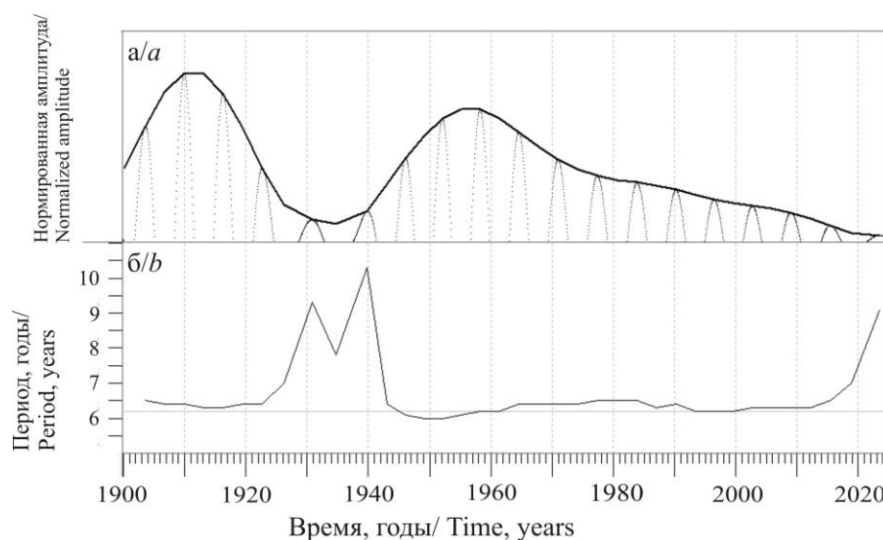


Рис. 6. Вариации амплитуды моды и периода движения Северного полюса в 1900–2024 гг.: а – амплитуды моды с периодом 6.3 года; б – периода (тонкая серая горизонтальная линия соответствует ровно трети периода движения лунных узлов в 6.2 года) /

Fig. 6. Variations in the amplitude of the mode and the period of the North Pole motion in 1900–2024: а – amplitudes of the mode with a period of 6.3 years; б – period (the thin gray horizontal line corresponds to exactly one third of the period of the lunar nodes motion of 6.2 years)

В настоящей работе не предлагается новый механизм происхождения чандлеровской составляющей движения полюса, но по-новому интерпретируется вид спектра движения полюса. Главным остается и вопрос: почему в исходном сигнале  $R$  не проявляет себя мода с периодом 538 суток, которая имеет такое важное значение для новой интерпретации спектральной картины? Отметим, что на основе примененного метода (спектральный анализ огибающей «шума» в определенной полосе частот) для деформационных данных земной коры (данные Баксанского лазерного интерферометра [Милюков и др., 2007]) были получены практически все теоретически предсказанные приливные волны в самом широком частотном диапазоне, которые невозможно было выделить в исходном деформационном ряде, и это при двадцатилетнем периоде наблюдений. Такой же подход был применен для ряда

вариации скорости вращения Земли LOD по данным бюллетеня MCB3 EOP14C04. Огибающая кривая строилась по «шуму» в полосе 100–10 суток. Спектральный анализ позволил выделить в огибающей известные приливные волны с периодами 182.7, 31.81, 27.55, 14.76, 13.77 суток, которые присутствовали и в исходном ряде LOD [Мясников, 2024]. Но кроме этого, уверенно были выделены моды с периодами: 18.62 лет, 27.093, 23.942, 18.707, 18.661, 11.049 суток, которые не были обнаружены в спектре исходного ряда.

Для каждого из приведенных выше рядов данных существует свой частотный диапазон, пригодный для дополнительного анализа по огибающей «шума». Так, для ряда данных движения полюса это диапазон 30–100 суток.

В хронологическом порядке сначала был установлен именно тот факт, что годовая и чандлеровская компонента ведут себя в противофазе (рис. 5), который был интерпретирован как взаимодействие двух связанных осцилляторов, которые находятся в постоянном обмене энергией. Но появление моды «N» с периодом 538 суток позволило более радикально пересмотреть и эту позицию, а именно существование одного осциллятора с изменяющимися параметрами под действием в первую очередь гравитации Луны.

### Заключение

Основным результатом проведенных исследований является выделение в спектрах вариаций движения Северного полюса Земли короткопериодных компонент и обоснование их единой природы. Их периодичность близка к циклам крупных (с магнитудой  $M \geq 7.0$ ) землетрясений Мира, приведенных в работе [Куликова, 2004]: 66, 25.7, 16.6, 11.8, 6.44, 2.56, 1.55 лет. Это позволяет ставить в качестве проблемы исследование связи сейсмичности и ротационного режима Земли.

Возможная связь астрономической компоненты с формированием и стилем современных геодинамических процессов обсуждалась в работе [Левин, 2000]. Ключевым при этом является вопрос о механизме преобразования энергии, возникающей при нутации оси вращения Земли, в энергию геодинамических процессов. В качестве такого механизма, как показано на примере формирования структуры Центрального сегмента Большого Кавказа [Стогний, Стогний, 2024], могут быть геологические течения на различных гипсометрических уровнях литосферы. На основе этой методики могут разрабатываться модели формирования напряженно-деформированного состояния литосферы и очаговых зон землетрясений сейсмоактивных регионов. Следует ожидать, что цикличность этих процессов будет определяться, как показано в настоящей работе, Чандлеровской составляющей и другими короткопериодными компонентами движения полюсов Земли.

Поиск закономерностей в характере сейсмической активности регионов, в частности, Северного Кавказа, и их связи с циклическими геодинамическими процессами представляет собой самостоятельную проблему, где результаты исследований по изучению вариаций компонент движения полюса Земли, представленные в настоящей статье, являются ее первым этапом.

### Литература

1. Алиев М.А., Магомедов А.Г., Алибеков М.С. Всплески сейсмической активности на территории Турции в октябре 2011 и феврале 2023 г. и их связь с вариациями сейсмичности Предкавказья. // Труды Института геологии ДНЦ РАН. – 2023. – № 1(92). – С. 38–53.

2. Баренбаум А.А. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчинённые процессы и эволюция. М.: ГЕОС, 2002. – 394 с.
3. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействий геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.
4. Вольвач А.Е., Курбасова Г.С., Вольвач Л.Н., Ипатов А.В. Особенности движения географического северного полюса Земли и скачки в геомагнитном поле. // Космические исследования. – 2022. – Т. 60. № 4. – С. 315–324.
5. Кочнев В.А. Детальная модель источников магнитного поля ядра Земли, полученная в результате решения обратной задачи магнитометрии. // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. № 4. – С. 559–579.
6. Крамер М.В., Молоденский М.С. Земные приливы и нутация Земли. М.: Изд. АН СССР, 1961. – 40 с.
7. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. М.: Физматгиз, 1962. – 400 с.
8. Куликова В.В. Неотвратимый маятник (или историческая драма человечества в солнечных циклах). // Философский и науковедческий аспекты развития естествознания. / Отв. редакторы В.Д. Михайлов, В.В. Стогний. Якутск: Изд. ЯГУ, 2004. – С. 77–84.
9. Куликова В.В., Куликов В.С., Бычкова Я.В., Бычков А.Ю. История Земли в галактических и солнечных циклах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. – 250 с.
10. Левин Б.В. Об астрономической компоненте тектонической силы. // Материалы XXXIII Тектонического совещания Общие вопросы тектоники России. Тектоника России. М.: ГЕОС, 2000. – С. 286–287.
11. Литасов К.Д., Шацкий А.Ф. Современные представления о составе ядра Земли. // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. №1. – С. 31–62.
12. Милюков В.К., Кобаев А.В., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В. Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье. // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 21–29.
13. Мясников А.В. Влияние приливной волны  $M_2$  на высокочастотную составляющую вариации параметров вращения Земли. // Динамические процессы в геосферах. – 2024. – Т. 16. № 2. – С. 22–27.
14. Научное наследие И.М. Сухова. Гравитация и геологические процессы. Очерки по истории геологических знаний. Вып. 29. СПб.: ВСЕГЕИ, 1994. – 153 с.
15. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. – 305 с.
16. Павленкин А.Д., Межевов Ю.В. Геодинамические системы Земли и их симметрия. // Геофизика. – 2009. – № 3. – С. 49–58.
17. Перепелкин В.В., Рыхлова Л.В., Вэй Ян Сое. О синфазности вариаций параметров движения земного полюса и прецессии орбиты. // Астрономический журнал. – 2022. – Т. 99. № 1. – С. 75–87.
18. Стогний В.В. Физика планет Солнечной системы: учебное пособие для вузов. 2-е изд., исправленное и дополненное. – СПб.: Лань, 2023. – 248 с.
19. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001.
20. Тараканов Ю.А. Новый тип строения и динамики Земли, Луны, Венеры и Марса. // Геофизика. – 1999. – № 5. – С. 62–68.
21. Kurbasova G.S., Rykhlova L.V., Shlikar G.N. The empirical Melchior laws and parametric excitation of the Chandler wobble. // Astronomical Journal. – 2003. – Vol. 47. No. 6. – pp. 525–530. DOI: 10.1134/1.1583780.
22. Newcomb S. On the dynamics of Earth's rotation, with respect to the periodic variations of latitude. // Monthly Notes. – 1892. – Vol. 52.
23. Ormsby J.F. Design of numerical filters with application to missile data processing. // Journal of the association for computing machinery. – 1961. – Vol. 8(3).

24. Wang G., Liu L., Su X., Liang X. et al. Variable Chandler and annual wobbles in Earth's polar motion during 1900–2015. // *Surveys in Geophysics*. – 2016. – Vol. 37(6). – pp. 1075–1093.
25. Woolard E. *Theory of the rotation of the Earth around its center of mass*. Vol. 15. Part 1. Washington: United States Government Print Office, 1953. – 165 p.

## References

1. Aliyev M.A., Magomedov A.G., Alibekov M.S. Bursts of seismic activity in Turkey in October 2011 and February 2023 and their relationship with seismicity variations in the Ciscaucasia. *Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023. No. 1(92). pp. 38–53. (In Russ.)
2. Barenbaum A.A. *Galaxy, Solar System, Earth. Subordinate Processes and Evolution*. Moscow. GEOS. 2002. 394 p. (in Russ.)
3. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geocological load of a mountainous region. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
4. Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N., Ipatov A.V. Features of the movement of the Earth's geographical north pole and jumps in the geomagnetic field. *Space Research*. 2022. Vol. 60. No. 4. pp. 315–324. (In Russ.)
5. Kochnev V.A. Detailed model of the sources of the magnetic field of the Earth's core, obtained as a result of solving the inverse problem of magnetometry. *Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64. No. 4. pp. 559–579. (In Russ.)
6. Kramer M.V., Molodensky M.S. *Earth tides and nutation of the Earth*. Moscow. Academy of Sciences USSR, 1961. 40 p. (In Russ.)
7. Kulikov K.A. *Variability of latitudes and longitudes*. Moscow. Fizmatgiz. 1962. 400 p. (In Russ.)
8. Kulikova V.V. The inevitable pendulum (or the historical drama of humanity in solar cycles). *Philosophical and scientific aspects of the development of natural science*. Responsible. Eds. V.D. Mikhailov, V.V. Stogny. Yakutsk. YSU. 2004. pp. 77–84. (In Russ.)
9. Kulikova V.V., Kulikov V.S., Bychkova Ya.V., Bychkov A.Yu. *History of the Earth in galactic and solar cycles*. Petrozavodsk. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2005. 250 p. (In Russ.)
10. Levin B.V. On the astronomical component of tectonic force. In: *Proceedings of the XXXIII Tectonic Conference General issues of tectonics of Russia*. Tectonics of Russia. Moscow. GEOS. 2000. pp. 286–287. (In Russ.)
11. Litasov K.D., Shatsky A.F. Modern ideas about the composition of the Earth's core. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 1. pp. 31–62. (In Russ.)
12. Milyukov V.K., Kopaev A.V., Lagutkina A.V., Mironov A.P., Myasnikov A.V. Observations of tidal deformations of the Earth's crust in the Elbrus region. *Physics of the Earth*. 2007. No. 11. pp. 21–29. (In Russ.)
13. Myasnikov A.V. Influence of the tidal wave M<sub>f</sub> on the high-frequency component of the variation in the parameters of the Earth's rotation. *Dynamic Processes in the Geospheres*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 22–27. (In Russ.)
14. *Scientific heritage of I.M. Sukhov. Gravity and geological processes. Essays on the history of geological knowledge*. Issue 29. Saint Petersburg. VSEGEI. 1994. 153 p. (In Russ.)
15. Otnes R., Enokson L. *Applied analysis of time series*. Moscow. Mir. 1982. 305 p. (In Russ.)
16. Pavlenkin A.D., Mezhevov Yu.V. Geodynamic systems of the Earth and their symmetry. *Geophysics*. 2009. No. 3. pp. 49–58. (In Russ.)
17. Perepyolkin V.V., Rykhlova L.V., Wei Y.S. On the synphase of variations in the parameters of the Earth's pole motion and orbital precession. *Astronomical Journal*. 2022. Vol. 99. No. 1. pp. 75–87. (In Russ.)

18. Stogny V.V. Physics of the Solar System Planets. A Textbook for Universities. 2nd ed., revised and supplemented. Saint Petersburg. Lan. 2023. 248 p. (In Russ.)
19. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the Earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–20. DOI: 10.46699/VNC.2024.37.52.001. (In Russ.)
20. Tarakanov Yu.A. New type of structure and dynamics of the Earth, Moon, Venus and Mars. *Geophysics*. 1999. No. 5. pp. 62–68. (In Russ.)
21. Kurbasova G.S, Rykhlova L.V., Shlikar G.N. The empirical Melchior laws and parametric excitation of the Chandler wobble. *Astronomical Journal*. 2003. Vol. 47. No. 6. pp. 525–530. DOI: 10.1134/1.1583780.
22. Newcomb S. On the dynamics of Earth's rotation, with respect to the periodic variations of latitude. *Monthly Notes*. 1892. Vol. 52.
23. Ormsby J.F. Design of numerical filters with application to missile data processing. *Journal of the association for computing machinery*. 1961. Vol. 8(3).
24. Wang G., Liu L., Su X., Liang X. et al. Variable Chandler and Annual Wobbles in Earth's Polar Motion During 1900–2015. *Surveys in Geophysics*. 2016. Vol. 37(6). pp. 1075–1093.
25. Woolard E. Theory of the rotation of the Earth around its center of mass. Vol. 15. Part 1. Washington: United States Government Print Office. 1953. 165 p.