

УДК 523.3

ВАРИАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЧАНДЛЕРОВСКОЙ И ГОДОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО ДАННЫМ ДВИЖЕНИЯ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА С 1962 г.

© 2024 г. А. В. Мясников*

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: andrey0405@mail.ru

В работе проведен анализ вариации амплитуды и периодов Чандлеровской и годовой составляющих по данным бюллетеня EOP14C04 Международной Службы Вращения Земли (МСВЗ) и опорных систем International Earth Rotation and Reference Systems (IERS), который содержит данные отклонения Северного полюса с 1962 г. по настоящее время с шагом одни сутки. Специально созданным цифровым симметричным нерекурсивным фильтром осуществлено выделение основных гармоник движения полюса. Показано, что эти составляющие проявляют себя как две связанные осциллирующие системы, которые находятся в постоянном обмене механической энергией, и изменение энергии этих колебаний имеет зеркально симметричный вид. Этот обмен происходит от состояния полного доминирования Чандлеровской составляющей до почти полного ее затухания. Последнее обстоятельство позволяет сделать оценку относительных масс этих осциллирующих систем, что показывает исключительную роль ядра Земли в формировании Чандлеровской составляющей движения полюса.

Ключевые слова: движение полюса, Чандлеровское колебание, нерекурсивный фильтр, спектральный анализ, осциллирующая система.

Для цитирования: Мясников А.В. Вариация параметров Чандлеровской и годовой составляющих по данным движения Северного полюса с 1962 г. // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 28–35. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_28

Введение

Положение Северного полюса определяют прямоугольными координатами X и Y . За начало отсчета принято усредненное положение полюса за период 1900–1905 гг. [Сидоренков, 2003], которое называется международным условным началом (МУН). Согласно МУН ось X направлена вдоль нулевого меридиана в сторону Гринвича, а ось Y – вдоль меридиана 270° в.д. (-90°). За единицу измерения принята 0.1 секунды дуги, что соответствует отклонению 3.086 м [Сидоренков, 1980].

Мгновенный полюс перемещается по земной поверхности вокруг среднего полюса в направлении вращения Земли, т.е. против часовой стрелки. Траектория движения имеет вид спирали, которая периодически раскручивается или закручивается. Отклонение от центра спирали не превышает 15 м. За весь период наблюдений самое сильное затухание движения полюса было зарегистрировано в 1920–1940 гг., а самое максимальное – в 1905–1915 и 1950–1960 гг.

Сам центр спирали, в результате векового движения, постоянно смещается относительно начала координат МУН и движется в сторону Северной Америки (меридиан 290° В.Д.) со скоростью около 10 см в год.

Спектральный анализ выделяет две доминирующие составляющие: Чандлеровскую с периодом 1.1 года и годовую. Сложение двух гармоник на соответствующих периодах порождают биения с периодом примерно 6.3 года. Годовая гармоника – это вынужденные колебания, обусловленные сезонными перемещениями воздушных и водяных масс по поверхности Земли [Сидоренков, 2003], и

не вызывает принципиальных вопросов. Чандлеровская гармоника [Chandler, 1891], согласно принятой модели – это главная мода свободной нутации Земли плюс эффекты упругих деформаций земной коры. Такое положение дел с модельным объяснением изменчивости широт (ИШ), на настоящий момент, нельзя считать удовлетворительным [Runcorn et al., 1988]. Для этой модели требуется как импульсное возбуждение, так и последующее затухание, которые наблюдениями не зарегистрированы. Таким образом, модель свободной нутации не применима к объяснению закономерностей наблюдаемого изменения широт [Авсюк, 1980].

Современные геофизические исследования дают основания рассматривать Землю как структурно-неоднородное тело. Перемещения оси вращения в структурно-неоднородном теле могут происходить не только при свободной нутации, но и под действием внешней силы; как и объясняются годовые движения оси из-за перемещения масс атмосферы.

Для наших целей достаточно рассмотрение общей структурной схемы строения Земли [Стейси, 1972], согласно которой Земля – эллипсоид, состоящий из твердой (упругой) оболочки толщиной 2900 км и массой $4.1 \cdot 10^{27}$ г, внутри которой имеется полость, заполненная жидкостью массой $1.8 \cdot 10^{27}$ г; в центре полости – твердый сфероид, т.е. внутреннее ядро с радиусом 1220 км и массой $0.1 \cdot 10^{27}$ г. По геомагнитным наблюдениям отмечается слабая рассогласованность вращения структур, при которой направления оси вращения оболочки и оси ядра различаются на величину порядка 10^{-5} рад. Внутренний сфероид «взвешен» в окружающей его жидкости, плотность которой отлична от его плотности на $0.1\text{--}0.5$ г/см³. Механическая связь сфероидов со всей Землей характеризуется некоторым коэффициентом K , через который определяется собственная частота колебаний ω_0 , и через который можно пересчитать модуль внешней силы в перемещения сфероидов. Смещения сфероидов повлекут за собой изменения положения центра масс Земли ΔR относительно внешней оболочки. Мгновенная ось вращения спроектирует на поверхность эти изменения ΔR , которые будут восприняты как движение полюса.

Кроме процессов, происходящих в ядре и мантии, дополнительными (второстепенными) причинами могут быть так называемое Южное колебание, океанические процессы, перераспределения подземных вод и взаимодействие различных оболочек Земли с небесными телами.

Все это приводит к тому, что особый интерес представляет анализ изменения амплитуд и периодов годовой и Чандлеровской составляющих вариации положения полюса, чему и посвящена данная работа.

Анализ данных и выбор полосового фильтра

В настоящее время имеется ряд координат Северного полюса X и Y по данным бюллетеня EOP14C04, вычисленный МСВЗ с начала 1962 г. по настоящее время с шагом 1 сутки. На рис. 1 (верхняя панель) изображен график полного отклонения R Северного полюса от начала координат, полученного как корень квадратный из суммы квадратов координат $R = (X^2 + Y^2)^{0.5}$, и только с этим рядом идет дальнейшая работа. Действительно, виден линейный тренд (см. рис. 1), который в данной работе был удален с помощью высокочастотного фильтра с частотой среза, соответствующей 2000 суткам, и полученный таким образом сигнал отмечен серым цветом на заднем плане (рис. 1, средняя панель). На рис. 2 показан результат спектрального анализа ряда R в диапазоне периодов 130–500 суток.

В более низкочастотной области существует ещё одна гармоника с периодом 2300 суток (6.3 года) и амплитудой $5.7 \cdot 10^{-3}$ угловых секунды, которая есть результат биения Чандлеровской и годовой составляющей (см. рис. 1, верхняя и средняя панели). В диапазоне 0–5000 суток 95% мощности сигнала R приходится на два, относительно узких интервала периодов: 410–450 суток (Чандлеровская составляющая) и 360–372 суток (годовая составляющая). Выделим эти две составляющие из общего сигнала с помощью полосового цифрового фильтра.

Полосовой фильтр строился в виде нерекурсивного импульсного фильтра с конечной областью отклика (ИКО) [Кендэл, 1981; Отнес, Эноксон, 1982]. Это вид симметричных фильтров, которые не имеют задержки фазы сигнала на выходе (нулевой фазовый угол). Параметры фильтра были подобраны

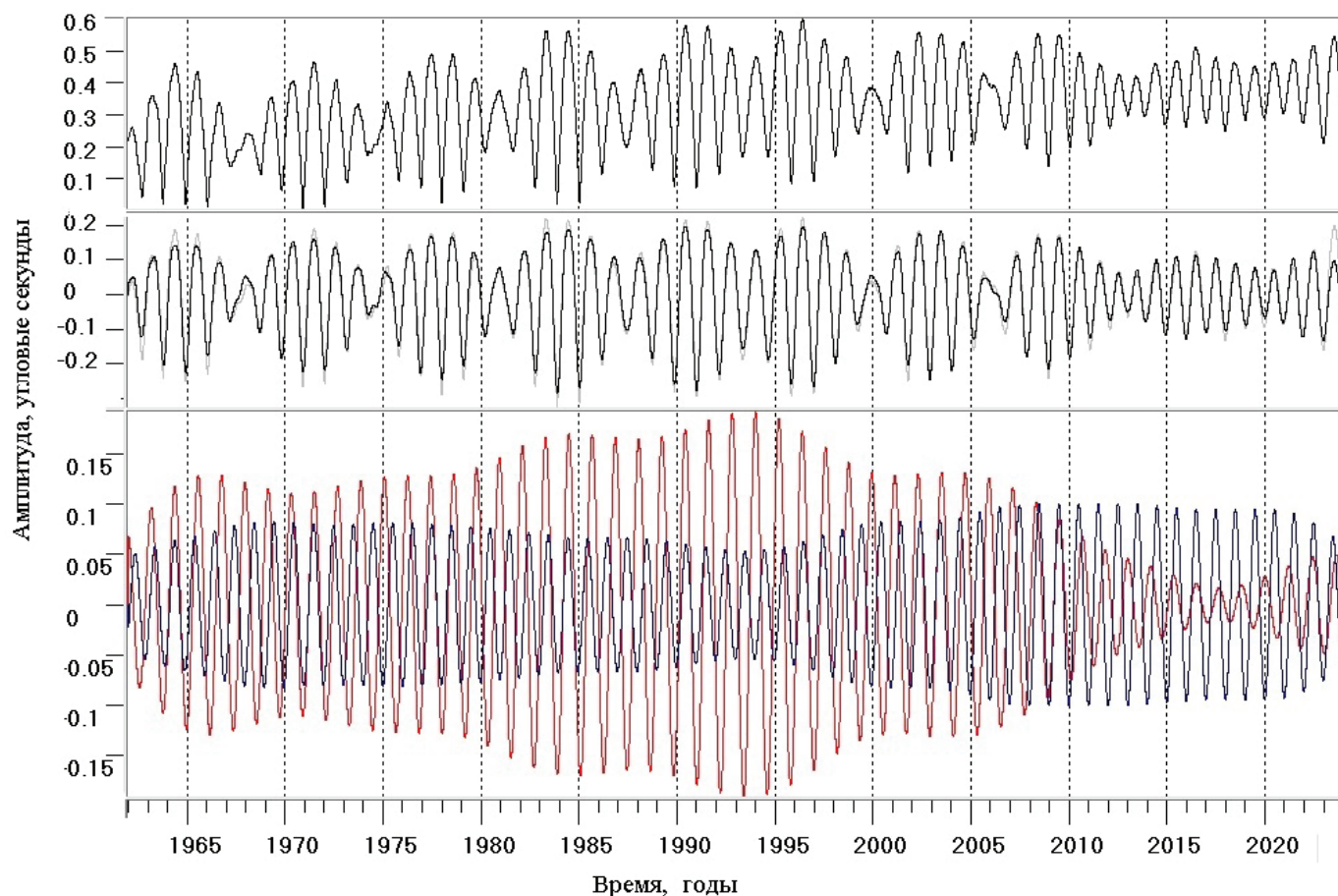


Рис. 1. Верхняя панель – исходный вид полного отклонения Северного полюса от начала координат с 01.01.1962 г. по настоящее время; средняя панель – серым цветом на заднем плане показан исходный ряд отклонения полюса с удаленным вековым смещением, черным цветом на переднем плане обозначен результат суммирования выделенных полосовым фильтром гармоник Чандлеровской и годовой составляющих; нижняя панель – красным цветом показана Чандлеровская составляющая полного отклонения, синим – годовая составляющая

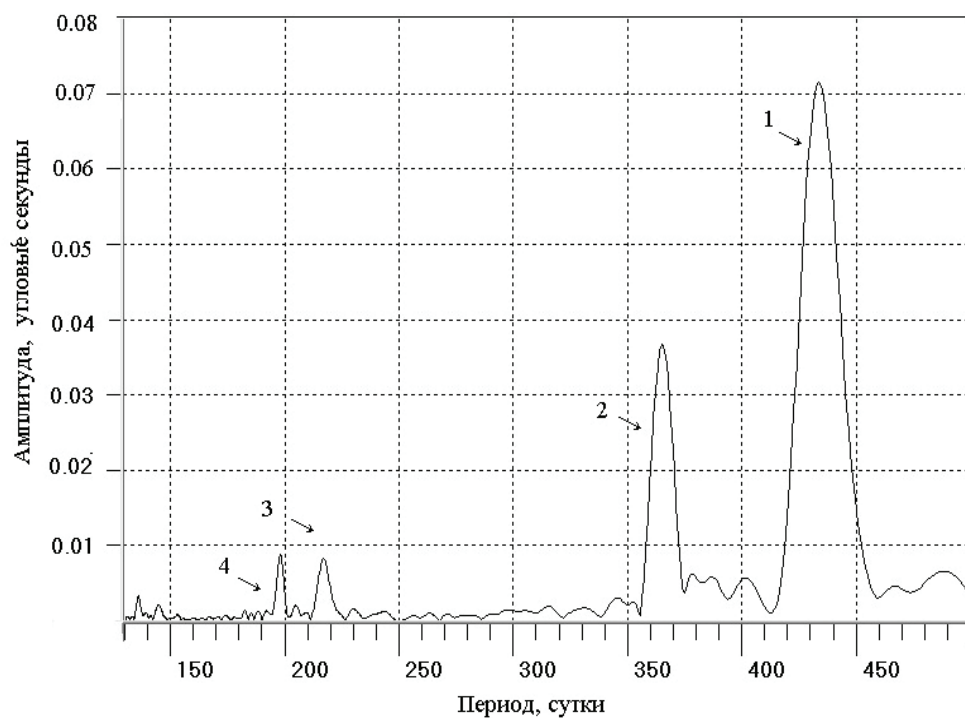


Рис. 2. Результат спектрального анализа отклонения Северного полюса в диапазоне периодов 130–500 суток. 1 – Чандлеровская составляющая, 2 – годовая составляющая, 3, 4 – кратные периоды

в соответствии с методикой, разработанной в работе [Ormsby, 1961]. Одно из основных преимуществ такого фильтра – это улучшение обработки низких частот. Одним из недостатков – возможное искажение крайних точек выходного сигнала после фильтрации во временной области. Размером области отклика фильтра был выбран диапазон 1200 точек (суток), что обеспечит достаточно высокие характеристики. Но в таком случае это 3 года в начале и в конце сигнала (полная длина ряда 62 года), где возможны искажения амплитуды сигнала на выходе фильтра, и это надо учитывать.

Результат фильтрации полосовым импульсным фильтром показан на рис. 1 (нижняя панель). Красным цветом показана Чандлеровская компонента вариации движения полюса, синим – годовая компонента.

В данной работе очень важно показать, что цифровая фильтрация не внесла искажений в данные гармоник, произвольный артефакт. На рис. 1 (средняя панель) черным цветом показан результат суммирования этих двух гармоник на фоне исходного сигнала R (серый цвет) с удаленным дрейфом. Графики практически совпали даже с учетом того, что отброшены компоненты 3 и 4 (кратные гармоники, см. рис. 2).

Обсуждение результата

На рис. 3 (верхняя панель) показаны нормированные к одному масштабу вариации амплитуд Чандлеровской составляющей и годовой составляющей. Основной вывод: практически на всем интервале наблюдений эти две нормированные компоненты имеют зеркально-симметричный вид, уменьшение одной неизменно отражается на увеличении другой и наоборот. Но, что замечательно, вариации периодов этих компонент (рис. 3, нижняя панель) имеют квази-синхронный вид. Последнее обстоятельство вполне допускает, что эти два процесса есть результат одного внешнего (например, приливного) воздействия.

Воспользуемся простой моделью гармонического осциллятора. То есть, предположим

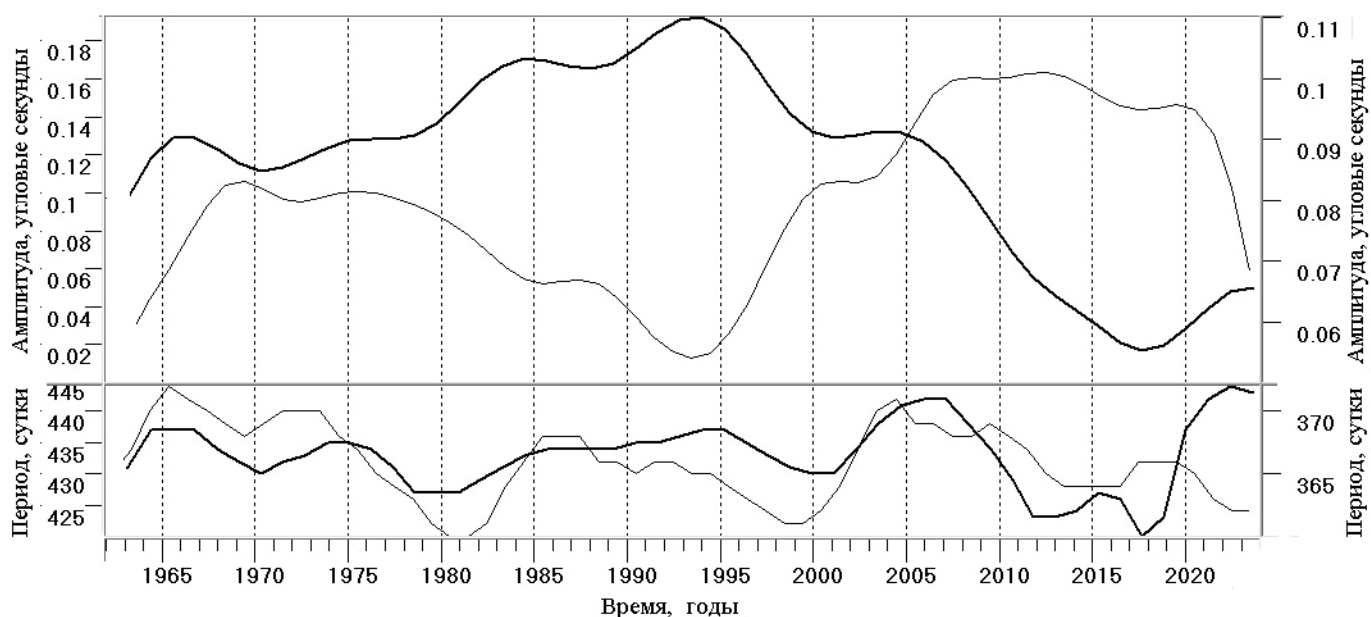


Рис. 3. Вариация параметров компонент движения Северного полюса в период наблюдений 1962–2024 гг. Верхняя панель – вариация амплитуды Чандлеровской компоненты (жирная линия, шкала слева), вариация амплитуды годовой компоненты (шкала справа); нижняя панель – вариация периода колебаний Чандлеровской компоненты (жирная линия, шкала слева), вариация периода колебаний годовой компоненты (шкала справа)

существование двух связанных механических колебательных систем, которые находятся в поле одних внешних воздействий и способны обмениваться энергией так, что общая энергия системы была постоянна.

Тогда, согласно этой модели, в случае полной потери энергии одной колебательной системой вся энергия будет сконцентрирована в другой. За период наблюдений 1962–2024 гг. были два уникальных момента. Первый – когда амплитуда Чандлеровской компоненты достигала своего абсолютного (см. рис. 3) максимума в 1993 г. и практически полной остановки годовой компоненты в том же году. Второй – в 2018 г., когда ситуация оказалась прямо противоположной [Зотов и др., 2022], с той лишь разницей, что абсолютный минимум Чандлеровской компоненты не полностью соответствовал абсолютному максимуму годовой компоненты. Воспользуемся этими двумя точками. Энергия механического осциллятора, как известно, определяется следующим выражением:

$$E = mA^2\omega^2/2, \quad (1)$$

где m – масса колебательной системы, A – амплитуда колебаний, ω – круговая частота колебаний ($T = 2\pi/\omega$ – период колебаний).

В 1993 г. практически вся энергия вариации движения полюса определялась Чандлеровской компонентой, отсюда и полная энергия, согласно (1) определялась только как

$$E_{ch} = 2\pi^2 m_{ch}(A_{ch}/T_{ch})^2, \quad (2)$$

в 2018 году эта энергия уже определялась как

$$E_e = 2\pi^2 m_e(A_e/T_e)^2. \quad (3)$$

Здесь подстрочный символ « ch » соответствует Чандлеровской компоненте, « e » – годовой компоненте.

Согласно сделанному допущению (см. выше) можно приравнять энергии E_{ch} и E_e за 1993 и 2018 гг. соответственно: $E_{ch}(1993) \approx E_e(2018)$, и получить оценку отношения масс колебательных систем:

$$m_{ch}/m_e = ((A_e/A_{ch})(T_{ch}/T_e))^2. \quad (4)$$

Для этой оценки воспользуемся внесистемными единицами, такими, в которых построены графики на рис. 3. За 1993 г. определяем $A_{ch} = 0.196$ угловых секунд, $T_{ch} = 436$ суток, благодаря 2018 г., когда был второй уникальный момент, определяем $A_e = 0.095$ угловых секунд, $T_e = 368$ суток. Тогда из (4) получим $m_{ch}/m_{me} = 0.33$. Это значение очень близко к отношению массы ядра Земли к ее полной массе $m_{\text{ядро}}/m_{\text{Земли}} = 0.32$.

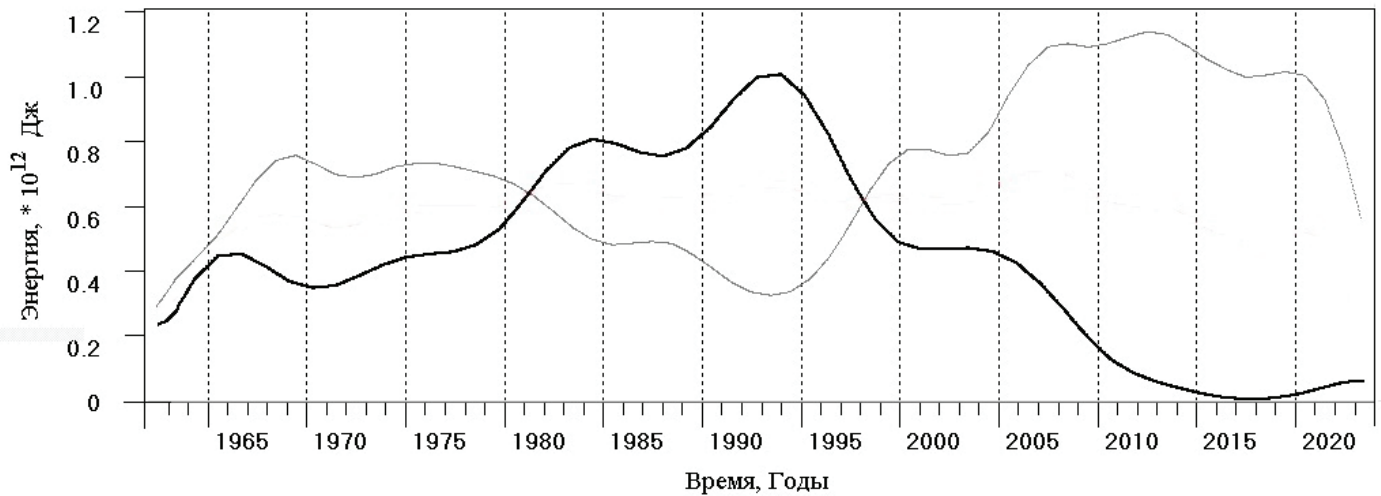


Рис. 4. Вариация энергии Чандлеровской компоненты (черная жирная линия) и годовой компоненты (серая линия) 1962–2024 гг.

Подставив значения реальных масс Земли ($m_{\text{Земли}} = 5.972 \cdot 10^{24}$ кг) и ядра Земли ($m_{\text{ядро}} = 1.932 \cdot 10^{24}$ кг) в (2) и (3) соответственно, переведя все единицы в СИ, получим вариацию энергии Чандлеровской и годовой компоненты за период 1962–2024 гг. (см. рис. 4). Заметим, что здесь графики уже не нормированные, построены в единой шкале и сохранили свою зеркальную симметрию.

Выводы

Чандлеровская составляющая, как и годовая составляющая движения полюса Земли, имеет переменную амплитуду и период. Вариация периодов происходит относительно синхронно, что указывает на схожую природу этих двух процессов.

Основной вывод заключается в том, что увеличение амплитуды одной из составляющих «зеркально» отражается на уменьшении амплитуды другой, что указывает на то, что эти процессы связаны и находятся в постоянном обмене энергии. Это обстоятельство послужило причиной для рассмотрения механизма движения северного полюса без учета линейного дрейфа, в виде двух связанных механически осцилляторов, общая энергия которых постоянна. Таким образом, изменяемость широт (ИШ) следует рассматривать не как проявление свободной нутации, а как процесс, обусловленный вынужденными движениями ядра, происходящими на фоне вынужденной нутации вращения структурно-неоднородной Земли. Сложилась ситуация с противоречиями между собранной эмпирикой и реконструкцией процесса изменяемости широт в рамках принятой модели свободной нутации. Действительно, для этой модели требуется как импульсное возбуждение, так и последующее затухание, которые наблюдениями не зарегистрированы. Поэтому положение дел с модельным объяснением ИШ, по крайней мере на настоящий момент, нельзя считать удовлетворительным [Runcorn et al., 1988]. При этом вопрос о возможности одновременной реализации как вынужденной прецессии и нутации, так и свободной нутации до сих пор оставлен без ответа.

Абсолютный максимум в 1993 г. и абсолютный минимум в 2018 г. амплитуды Чандлеровской компоненты дали возможность сделать оценку отношения масс этих двух осцилляторов. Это отношение показало, что Земля как целое должна рассматриваться для годовой компоненты и ядро Земли для Чандлеровской компоненты.

Вместо заключения

Именно тот факт, что вариация амплитуд двух компонент движения Северного полюса после разделения исходного сигнала имеет выраженный противофазный характер послужил основанием для написания этой статьи. При создании этой работы применялась стандартная методика построения процедуры цифровой фильтрации, используемая автором на протяжении многих лет, что не допускает возможности ошибки, за исключением той оговорки, что приведена в тексте. Но, тем не менее, автор не встречал в других работах подобного результата. Оценка энергии осцилляторов показала полную «зеркальную» симметрию вариации в период 1970–2020 гг.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ГАИШ МГУ (ГАИШ 5.2, номер ЦИТИС: 121031500155-6), а также рубрики ГРНТИ 41.15.31 «Вращение Земли. Измерение времени в астрономии. Движение земных полюсов».

Список литературы

Авсюк Ю.Н. Возможное объяснение процесса изменяемости широт // Доклады академии наук. 1980. Т. 254. № 4. С. 834–837.

Зотов Л.В., Сидоренков Н.С., Бизуар К.Ж. Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы // Вестник Московского университета. 2022. Серия 3: Физика, астрономия. М. : Изд-во Моск. ун-та. Т. 77. № 7. С. 64.

- Кендэл М. Временные ряды // Финансы и статистика. Москва. 1981.
- Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М. : Издательство «Мир». 1982.
- Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Гидрометеоздат. Санкт-Петербург. 2003.
- Сидоренков Н.С. Неправильности вращения Земли как возможные показатели глобального водообмена // Метеорология и гидрология. 1980. № 1. С. 52–59.
- Стейси Ф. Физика Земли. Москва. Мир. 1972. – 342 с.
- Chandler S.C. On the variation in latitude // Astron. J. 1891. Vol. 248 (59).
- Ormsby J.F. Design of numerical filters with application to missile data processing // Journal of the association for computing machinery. 1961. Vol. 8 (3).
- Runcorn S.K., Wilkins G.A., Groten E. et al. The excitation of the Chandler Wobble // Survey in Geophysics. 1988. Vol. 9. P. 429–449. <https://doi.org/10.1007/BF01901631>

VARIATION OF THE PARAMETERS OF THE CHANDLER AND ANNUAL COMPONENTS ACCORDING TO THE MOVEMENT OF THE NORTH POLE SINCE 1962

© 2024 A. V. Myasnikov*

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

**E-mail: andrey0405@mail.ru*

The paper analyzes the variation in the amplitude and periods of the Chandler and annual components according to the International Earth Rotation and Reference Systems (IERS) bulletin EOP14C04, which contains data on the deviation of the North Pole from 1962 to the present with the sampling time of one day. A specially created digital symmetrical non-recursive filter was used to isolate the main harmonics of the pole motion. It is shown that these components manifest themselves as two connected oscillating systems that are in permanent exchange of mechanical energy, and the change in the energy of these oscillations has a mirror-symmetrical appearance. This exchange occurs from a state of complete dominance of the Chandler component to its almost complete attenuation. The latter circumstance allows us to estimate the relative masses of these oscillating systems, which shows the exceptional role of the Earth's core in the formation of the Chandler component of the pole's movement.

Keywords: pole motion, Chandler oscillations, non-recursive filter, spectral analysis, oscillating system.