



Предварительный анализ годовой составляющей движения полюса на 180-летнем интервале данных

Н. О. Миллер*, З. М. Малкин

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Поступила в редакцию 27 октября 2024 / Принята к публикации 14 ноября 2024

Аннотация

В работе приведены предварительные результаты изучения вариаций годичной составляющей в движении полюса Земли. Для этого сигнал с годичным периодом был выделен, во-первых, из рядов координат полюса Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS), а во вторых, из объединённого ряда изменения широты Пулкова за 1840–2017 гг. Для этого применялся сингулярный спектральный анализ. Для вычисления изменения амплитуды и фазы годичного колебания со временем использовалось преобразование Гильберта. В результате оказалось, что на интервале около 180 лет наблюдается почти монотонный рост амплитуды годичного колебания с ≈ 60 мсд до ≈ 90 мсд и почти монотонное возрастание фазы на $\approx 45^\circ$, причем в обоих случаях рост значительно замедляется в начале 1960-х гг. Также обнаружена корреляция между амплитудой годовой составляющей и разницей средних температур ноябрь–март северного и южного полушарий.

Ключевые слова: Вращение Земли, движение полюса, годовая составляющая, вариации широты Пулкова

Введение

В движении полюса Земли выделяются две основные составляющие: чандлеровское колебание с периодом около 14 месяцев и годичное колебание. В литературе в большинстве случаев приводятся результаты изучения первой из них, см., например, Vondrák (1988), Nastula и др. (1993), Schuh, Nagel и Seitz (2001), Миллер (2011), Chao и Chung (2012) и Зотов, Сидоренков и Бизуар (2022) и цитируемые там работы.

Годовая составляющая движения полюса изучалась намного реже, особенно по длинным рядам данных длиной более ста лет. В работах Vondrák (1988), Nastula и др. (1993) и Schuh, Nagel и Seitz (2001) выделены вариации амплитуды годичного колебания. Все исследования показывают, что эти изменения намного меньше по величине, чем вариации амплитуды чандлеровского колебания. В то же время результаты, полученные разными авторами несколько различаются. Кроме того, Vondrák (1988) выделил изменения фазы годового колебания, а в работе Schuh, Nagel и Seitz (2001) рассмотрены (математически эквивалентные) возможные изменения периода годового колебания.

Таким образом можно сделать вывод, что годичная составляющая движения полюса Земли еще недостаточно изучена и имеет смысл продолжать эти исследования с использованием более длинных рядов данных и альтернативных математических методов. Настоящая работа является еще одним шагом в этом направлении. Мы здесь исследовали существенно более длинные ряды координат полюса, чем были использованы в предыдущих работах, и уникальный комбинированный ряд изменения широты Пулкова длиной около 180 лет. Для выделения годичной составляющей, в отличие от отмеченных выше работ, использовался сингулярный спектральный анализ (ССА, Golyandina, Nekrutkin и Zhigljavsky (2001)).

*e-mail:natmiller@list.ru

1 Данные и методы

В данной работе была исследована годовая составляющая движения полюса Земли по данным о движении полюса Международной службы вращения Земли и опорных систем координат¹ (IERS): ряды координат полюса IERS C01 за 1846–2018 гг. и IERS C04 за 1962–2018 гг., а также объединённого ряда изменения широты Пулкова φ за 1840–2014 гг., в котором непосредственно отражаются все изменения координат полюса, см. (1). Для формирования объединённого ряда изменения широты Пулкова были использованы определения широты, произведенные в разные периоды времени на разных инструментах Пулковской обсерватории. В периоды, за которые определения широты Пулкова недоступны, ряд дополнен значениями, вычисленными по координатам полюса X_p и Y_p рядов IERS C01 и C04 по формуле:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = X_p \cos \lambda + Y_p \sin \lambda = 0.8631 X_p - 0.5049 Y_p, \quad (1)$$

где λ – широта Пулкова (ЗТФ-135). Данные, использованные для объединённого ряда широты Пулкова для разных периодов времени, приведены в табл. 1. Более подробно процесс построения объединённого ряда широты описан в (Миллер, 2011).

Таблица 1: Данные, использованные для формирования сводного ряда широты Пулкова.

Инструмент/ряд	Вид данных	Интервал дат
Большой вертикальный круг Эртеля	широта	1840–1842
Пассажный инструмент Репольда в первом вертикале	широта	1842–1846
IERS C01	X_p, Y_p	1846–1904
ЗТФ-135	широта	1904–1941
IERS C01	X_p, Y_p	1941–1948
ЗТФ-135	широта	1948–2006
IERS C04	X_p, Y_p	2006–2018

На рис. 1 приведены спектры двух основных рядов, использованных в настоящей работе: ряда IERS C01 и объединённого ряда широты Пулкова. Спектр охватывает диапазон периодов, включающий в себя как годовую, так и чандлеровскую компоненты движения полюса, которые являются основными составляющими движения полюса и вариаций широты. Вид спектра показывает, что эти две компоненты могут быть эффективно разделены при использовании подходящей полосовой фильтрации.

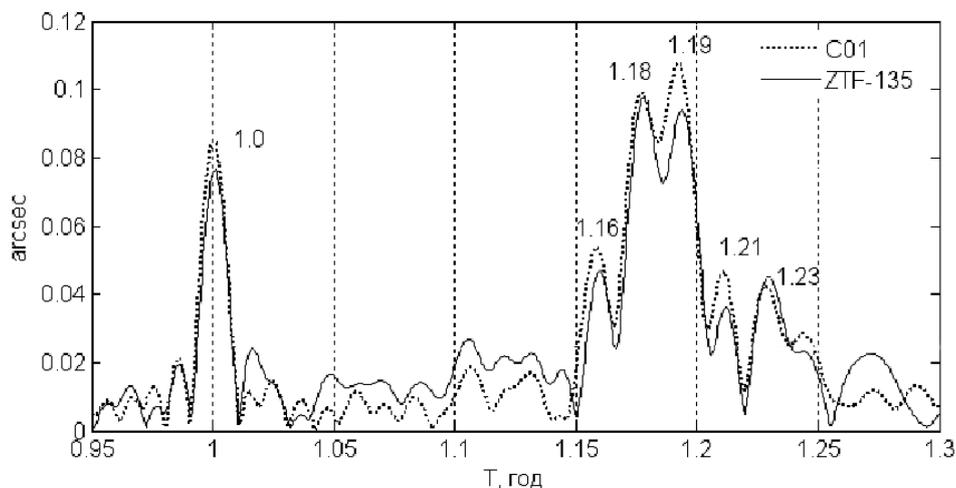


Рис. 1: Фурье-анализ исходных рядов.

¹<https://datacenter.iers.org/eop.php>

Для выделения и анализа годовой составляющей движения полюса в данной работе был использован метод ССА. В основе этого метода и его многомерной модификации (МССА) лежит преобразование временного ряда в матрицу и ее сингулярное разложение, приводящее к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты. При использовании этого метода производится вычисление выборочной корреляционной матрицы, собственные числа которой λ_i являются выборочными дисперсиями соответствующих главных компонент. Эти компоненты определяются таким образом, чтобы первая из них давала максимально возможный вклад в суммарную дисперсию. Выполняемое преобразование не меняет сумму дисперсий, а только перераспределяет ее так, чтобы наибольшая дисперсия приходилась на первые компоненты, что создает возможность исключить из анализа компоненты, имеющие малые дисперсии и, соответственно, относительно небольшой вклад (относительную мощность сигнала) в изучаемый процесс. Процент вклада i -ой компоненты вычисляется по формуле:

$$V_i = \frac{\lambda_i}{M} \times 100\%, \quad (2)$$

где $M = N/2$, N – длина (число точек) ряда, λ_i – i -ое собственное число.

Комплексное преобразование Гильберта применялось для определения вариаций амплитуды и фазы годовой компоненты движения полюса (вычисления проводились с функцией `hilbert` из Matlab Signal Processing Toolbox).

2 Годовая составляющая в движении полюса и в изменении широты Пулкова

Выделение годового колебания в движении полюса из ряда IERS C01 (черные линии на рис. 2) было произведено методом МССА, который дает возможность совместно анализировать ряды координат полюса Xp и Yp как единый двумерный ряд данных. Результирующий годовой сигнал изображен красными линиями на рис. 2 совместно с исходными рядами координат полюса IERS C01 (черные линии). Альтернативный ряд годового сигнала в движении полюса был выделен из 180-летнего объединённого ряда изменения широты Пулкова с помощью одномерного варианта метода ССА. Этот ряд представлен на рис. 3. Черной линией на рисунке изображен исходный ряд вариаций широты Пулкова. Как можно видеть из сравнения приведенных данных, все три ряда годовой компоненты движения полюса близки между собой.

Дальнейший анализ рядов годовой составляющей был проведен с помощью преобразования Гильберта с целью изучения вариаций амплитуды и фазы этого колебания. Результаты этого анализа, приведённые на рис. 4, показывают, что на протяжении изучаемого 180-летнего периода наблюдается медленный рост амплитуды годового члена с ≈ 60 мсд до ≈ 90 мсд до начала 1960-х гг., после чего амплитуда остается практически постоянной. Аналогичное поведение демонстрирует и фаза годового члена, которая возросла на $\approx 45^\circ$ с 1840 г. до начала 1960-х гг., после чего стала изменяться намного медленнее.

На рис. 5 приведено сопоставление данных изменения широты с одним из рядов климатических данных: сверху приведена кривая изменения амплитуды годовой составляющей, внизу – кривая разницы средних температур ноябрь–март северного и южного полушарий Земли². На той и другой кривой виден перегиб около 1960 г. Известно, что годовое колебание в движении полюса объясняется как вынужденное колебание, вызванное сезонными изменениями в атмосфере, океане и гидросфере. Таким образом можно предположить, что одной из причин этого явления служит воздействие изменения климата на вращение Земли через долговременные климатические изменения в глобальных атмосферных процессах.

²ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/20thC_ReanV2/Monthlies/gaussian/monolevel/

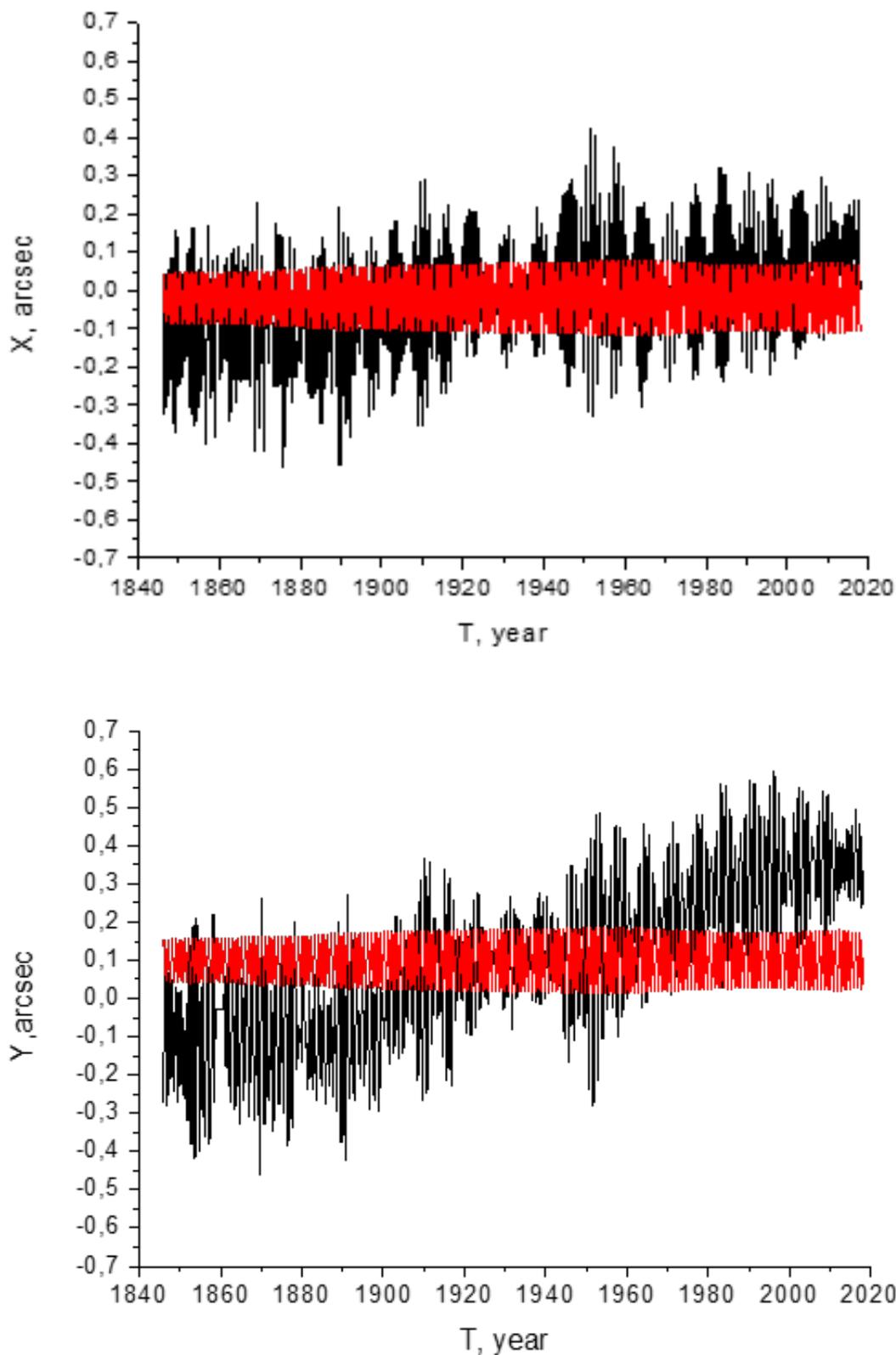


Рис. 2: Результат применения МССА к ряду IERS C01: сверху – координата полюса X_p , снизу – координата полюса Y_p . Черным цветом показано полное изменение координат полюса, красным – выделенная годовая составляющая.

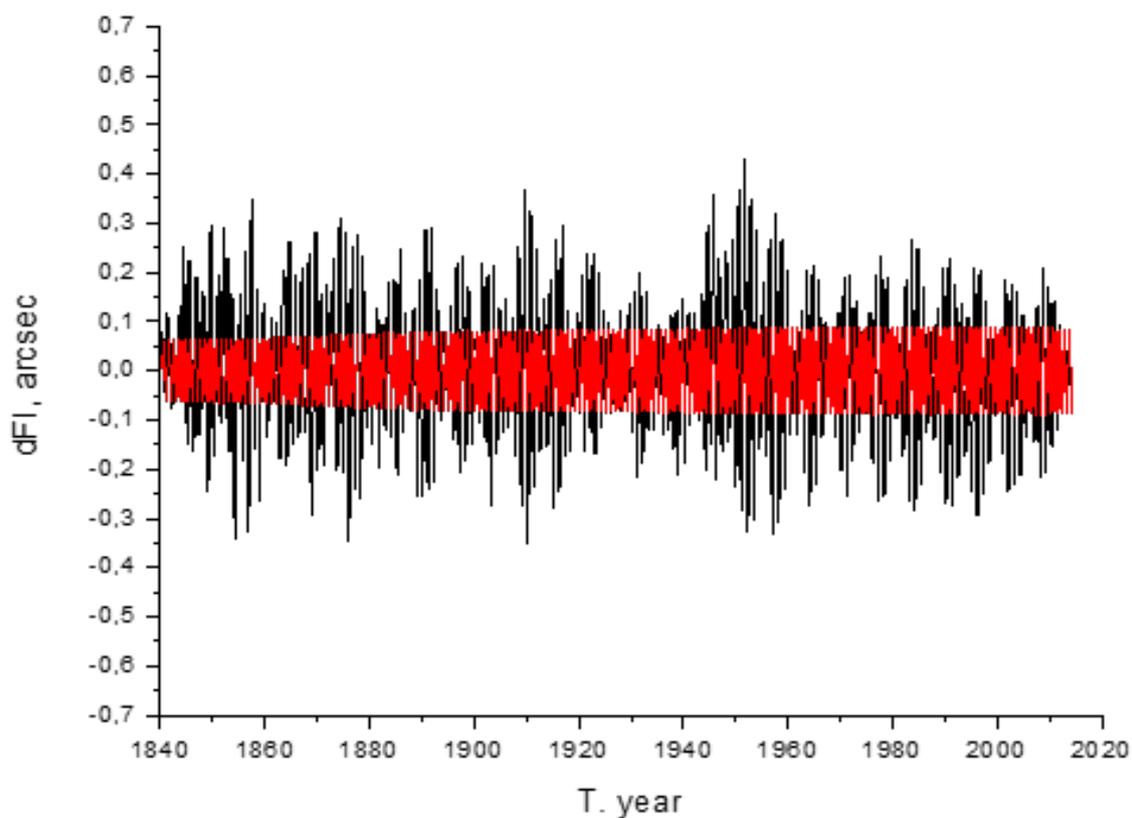


Рис. 3: Результат применения ССА к объединённому ряду широты Пулкова. Черным цветом показано полное изменение широты, красным – выделенная годовая составляющая.

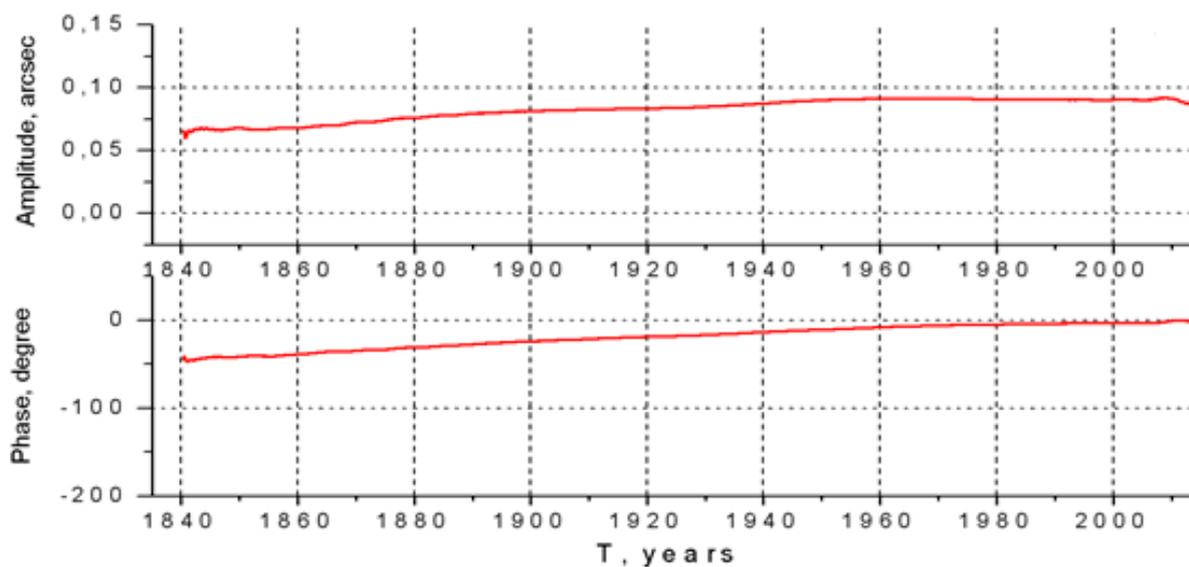


Рис. 4: Изменение амплитуды и фазы годового движения полюса, выделенного методом ССА из объединённого ряда широты Пулкова. Амплитуда и фаза за 180 лет выросли на $0.03''$ и 45° , соответственно.

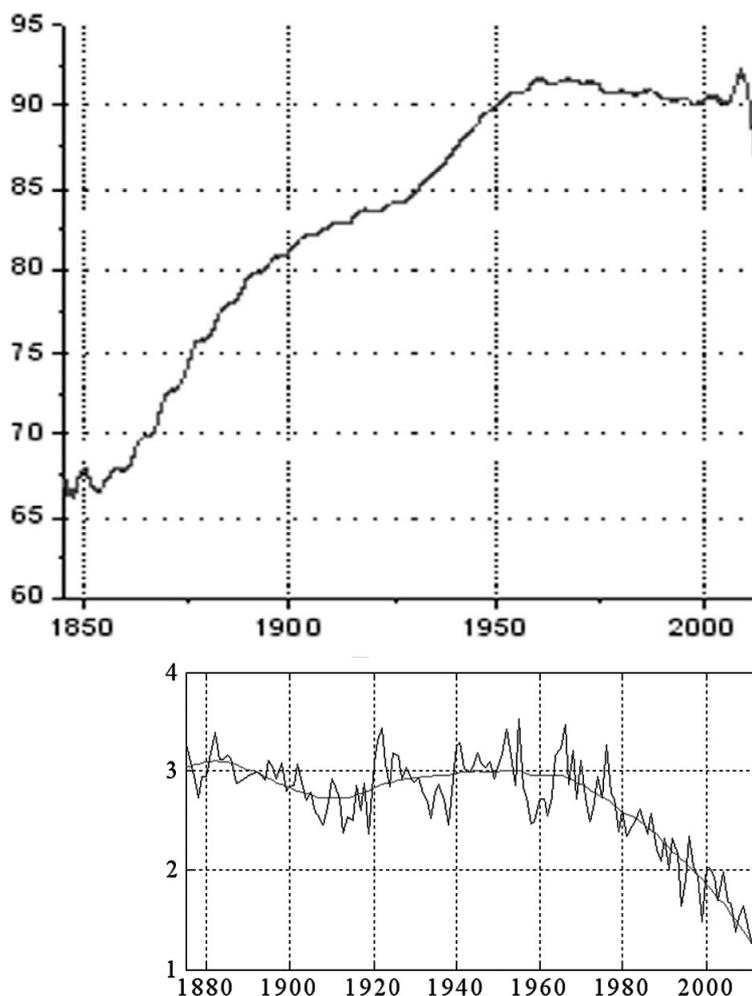


Рис. 5: Сверху – амплитуда годовой компоненты изменения широты Пулкова, мсд, внизу – разница средних температур ноябрь–март северного и южного полушарий Земли, град. На рисунке совмещены вертикальные проекции шкалы времени.

3 Заключение

В настоящей работе проведено предварительное исследование годичной составляющей движения полюса по данным о движении полюса Земли IERS и из анализа комбинированного ряда изменения широты Пулкова длиной 180 лет с 1840 г. по настоящее время. С помощью метода ССА из этих рядов была выделена годовая составляющая и вариации её амплитуды и фазы. Сопоставление параметров вариации годичной составляющей движения полюса, вычисленных по двум исходным рядам данных, показало, что они очень близки между собой. В результате было получено, что ряд параметров годовой составляющей движения полюса на интервале около 180 лет демонстрирует почти монотонный рост амплитуды с ≈ 60 мсд до ≈ 90 мсд с одновременным монотонным смещением фазы на $\approx 45^\circ$. При этом рост амплитуды и смещение фазы практически прекратились около 60 лет назад. Также вариации годовой составляющей показывают особенности в поведении её амплитуды вблизи периода минимума амплитуды чандлеровского колебания в 1920-х годах. Найдена также корреляция между амплитудой годовой составляющей движения полюса и разницей средних температур ноябрь–март северного и южного полушарий. Это позволяет предположить связь между параметрами движения полюса Земли и изменениями климата, что может являться отражением влияния различных процессов в атмосфере и гидросфере на движение полюса.

Список литературы

- Vondrák, J. (1988). *Is Chandler Frequency Constant? В: The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics*. Под ред. Alice Kay Babcock и George Alan Wilkins. Т. 128. IAU Symposium, с. 359.
- Nastula, J., A. Korsun, B. Kołaczek, W. Kosek и W. Hozakowski (1993). *Variations of the Chandler and annual wobbles of polar motion in 1846-1988 and their prediction*. *Manuscr. Geod.* 18, с. 131–135.
- Schuh, H., S. Nagel и T. Seitz (2001). *Linear drift and periodic variations observed in long time series of polar motion*. *Journal of Geodesy* 74.10, с. 701–710.
- Миллер, Н. О. (2011). *Чандлеровское колебание в изменениях широты Пулково за 170 лет*. *Астрон. вестник* 45, с. 353–364.
- Chao, Benjamin F. и Wei-Yung Chung (2012). *Amplitude and phase variations of Earth's Chandler wobble under continual excitation*. *Journal of Geodynamics* 62, с. 35–39.
- Зотов, Л. В., Н. С. Сидоренков и К. Бизуар (2022). *Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы*. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия* Вып. 3, с. 64–72.
- Golyandina, N., V. Nekrutkin и A. Zhigljavsky (2001). *Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques*. Chapman и Hall/CRC (Second edition: Springer, 2020).

Preliminary analysis of the annual component of the polar motion over 180-year data interval

N.O. Miller, Z.M. Malkin

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Received 27 October 2024 / Accepted 14 November 2024

Abstract

The paper presents preliminary results of studying variations in the annual component in the Earth's polar motion. For this purpose, a signal with an annual period was extracted, firstly, from the series of pole coordinates of the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), and secondly, from the combined series of Pulkovo latitude variations for 1840–2017. For this purpose, one-dimensional and multidimensional singular spectrum analysis was used. The Hilbert transform was used to calculate the change in the amplitude and phase of the annual oscillation over time. As a result, it turned out that over an interval of about 180 years, an almost monotonic increase in the amplitude of the annual oscillation from ≈ 60 mas to ≈ 90 mas and an almost monotonic phase shift of $\approx 45^\circ$ are observed. A correlation was also found between the amplitude of the annual component and the difference in average temperatures from November to March in the northern and southern hemispheres.

Key words: Earth's rotation, polar motion, annual wobble, Pulkovo latitude variations