

О влиянии геофизических возмущений на колебания земного полюса с частотой прецессии лунной орбиты

Вэй Ян Сое*, Филиппова А.С.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: waiyan2032015@gmail.com*

Статья поступила 14.07.2021

Аннотация

В статье проводится анализ вклада геофизических возмущений (атмосферного и океанического) в колебательный процесс, синфазный с прецессией лунной орбиты. Получены решения дифференциальных уравнений движения земного полюса с учетом кинетического момента атмосферы и углового момента океана и выделены комбинационные гармоники, связанные с рассматриваемым колебательным процессом. Показано, что найденные гармоники могут быть частично обусловлены колебаниями подвижных сред атмосферы и океана.

Ключевые слова: земной полюс, чандлеровское колебание, геофизические возмущения.

Введение

Движение земного полюса представляет собой многочастотный динамический процесс, который происходит под воздействием внешних и внутренних сил – как

потенциальных (гравитационные силы и переносные силы инерции), так и непотенциальных, связанных с перемещением масс в геофизических средах и влияющих на динамические характеристики вращения деформируемой Земли [1, 2].

Современные высокоточные наблюдения позволяют выявлять неравномерности во вращении Земли с малыми амплитудами. Анализ данных экспериментальных наблюдений Международной службы вращения Земли (МСВЗ) [1] колебательного движения полюса позволяет говорить о наличие сложного динамического процесса, происходящего в системе Земля-Луна-Солнце и не имеющего объяснений в теории вращения Земли.

Ранее в [3] найдено преобразование координат земного полюса, результат которого показывает связанность некоторых вариаций колебательного процесса полюса с прецессией орбиты Луны. Более точно можно сказать, что удастся найти преобразование земной системы координат посредством операций вращений и сдвига к новой системе, в которой движение полюса оказывается синхронизированным с прецессией лунной орбиты.

В связи с этим интерес представляют исследования, направленные на установление небесномеханических и геофизических причин такого поведения чандлеровской и годичной компонент колебаний.

В статье, используя данные NCEP/NCAR [4] циркуляции атмосферы и данные NASA/JPL [5] углового момента океана, проведено численное интегрирование уравнений движения земного полюса. В результате интегрирования получено движение земного полюса, учитывающее основные геофизические возмущения.

Определен вклад атмосферных и океанических возмущений в колебательный процесс, синхронный с прецессионным движением лунной орбиты. Найдены комбинационные гармоники, получаемые как комбинация основных гармоник колебаний полюса и гармоники с частотой прецессии лунной орбиты.

Дифференциальные уравнения движения земного полюса с учетом геофизических возмущений

Пространственное движение лунной орбиты состоит из ряда вращений вокруг пересекающихся осей. Они приводят к циклическому движению её узлов и перигея. Кроме того, производные параметров орбиты отличны от нуля и величины непостоянные, подверженные малым вариациям. Следствием прецессии орбиты Луны и связанного с ней циклического изменения долготы восходящего узла с периодом 18.61 лет является изменение наклона плоскости орбиты к экватору Земли. Наклон орбиты Луны к земному экватору изменяется в пределах от 18.3° до 28.58° . При этом точка пересечения круга лунной орбиты с экватором совершает колебания вдоль экватора около среднего ее положения, совпадающего с точкой весеннего равноденствия. В отличие от узла (точки пересечения кругов лунной орбиты и эклиптики на небесной сфере), который совершает полный оборот, точка пересечения орбиты и экватора совершает колебания в пределах от -13.2° и до 13.2° .

В работах [3, 6-7] показано, что можно найти преобразование координат земного полюса, иллюстрирующее синфазность колебательного процесса земного полюса с комбинационными частотами 1 ± 0.05373 , 0.843 ± 0.05373 цикл/год и прецессии орбиты Луны. А именно, колебательное движение полюса за вычетом

чандлеровской (или годичной - в зависимости от значений амплитуд чандлеровской и годичной гармоник) и шестилетней цикличности происходит синфазно с колебаниями вдоль экватора точки пересечения лунной орбиты и экватора. Указанное свойство требует более детального анализа и исследования причин возникновения таких колебаний. В частности, представляет интерес установление вклада в эти колебания геофизических (атмосферных и океанических) возмущений.

Для этого необходимо определить движение земного полюса, проинтегрировав дифференциальные уравнения его движения с учетом геофизических возмущений [8 - 10]. Дифференциальные уравнения колебаний земного полюса могут быть получены из уравнений Эйлера-Лиувилля вращательного движения деформируемой Земли [11-13]:

$$\begin{aligned} J\dot{\omega} + \omega \times J\omega &= \mathbf{M} - J\dot{\omega}, \quad \omega = (p, q, r)^T, \quad J = J^* + \delta J, \quad J^* = \text{const}, \\ J^* &= \text{diag}(A^*, B^*, C^*), \quad \delta J = \delta J(t), \quad \|\delta J\| \ll \|J^*\| \\ \mathbf{M} &= \mathbf{M}^S + \mathbf{M}^L - \dot{\mathbf{h}} - \omega \times \mathbf{h}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ω - вектор угловой скорости в связанной с Землей системе координат. Оси выбранной системы координат приближенно совпадают с главными центральными осями инерции J^* "замороженной" фигуры Земли с учетом "экваториального выступа". Считается, что малые вариации тензора инерции δJ включают в себя различные гармонические составляющие, которые обусловлены регулярным возмущающим воздействием гравитационных суточных приливов от Солнца и Луны и, возможно, других, например, годичных, месячных и т.п. \mathbf{M}^S и \mathbf{M}^L - возмущающие моменты от Солнца и Луны соответственно, а \mathbf{h} - вектор суммарного кинетического момента подвижных сред (атмосферы и океана) [14-15].

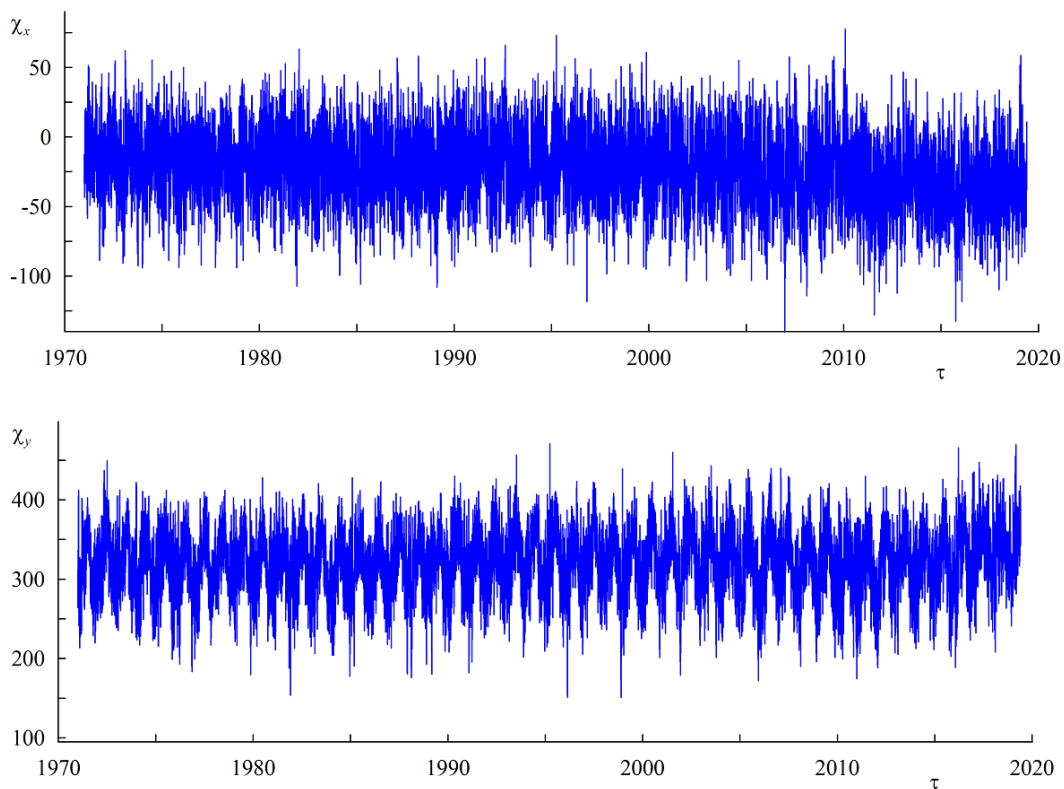


Рис. 1 Возмущения χ_x, χ_y от атмосферы

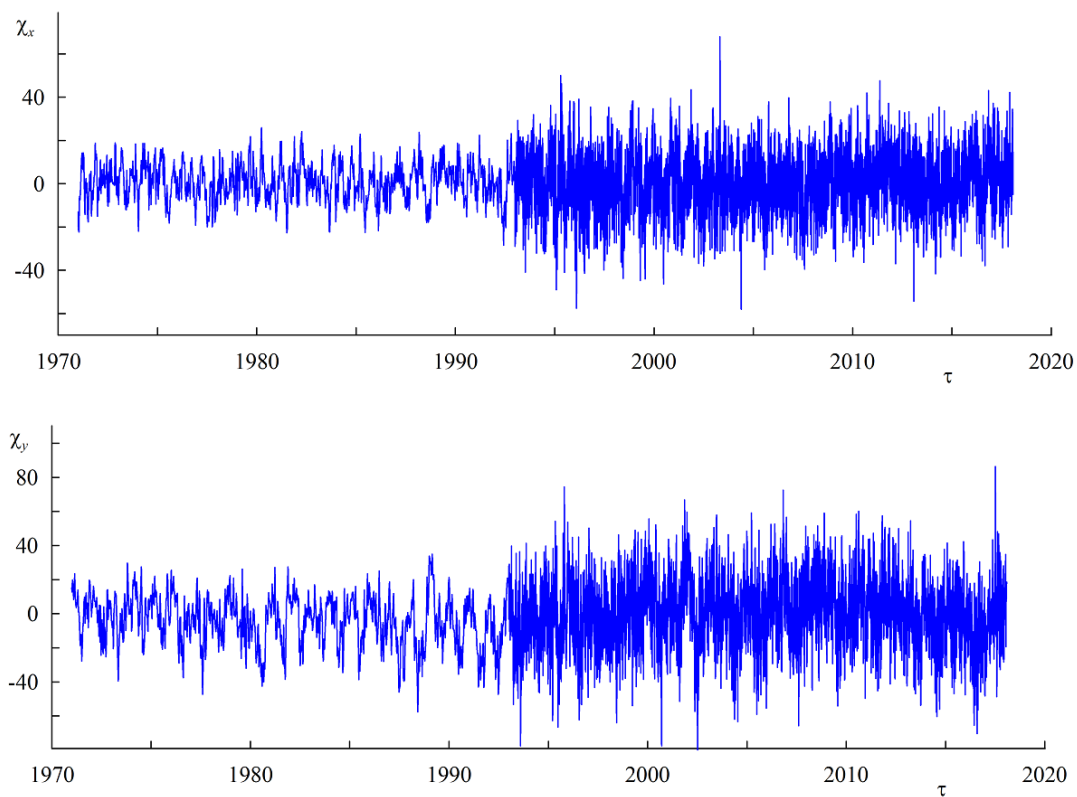


Рис. 2 Возмущения χ_x, χ_y от океана

Вследствие малости p, q ($p, q \ll r$) в первом приближении по p, q система дифференциальных уравнений для определения p, q примет вид [16, 17]:

$$\begin{aligned} \dot{p} + N_p q &= j_{qr}^0 + \mu_p, & p(t_0) &= p_0, \\ \dot{q} - N_q p &= -j_{pr}^0 + \mu_q, & q(t_0) &= q_0, \\ \delta \dot{r} &= \mu_r, & r(t_0) &= r_0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$N_p = \frac{C^* - B^*}{A^*} r_0, \quad N_q = \frac{C^* - A^*}{B^*} r_0, \quad r_0 = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с},$$

где $N = \sqrt{N_p N_q} \cong 0.84 \div 0.85$ циклов в год – средняя чандлеровская частота, а

$j_{pr}^0 = \langle J_{pr} r_0^2 \rangle_\varphi$, $j_{qr}^0 = \langle J_{qr} r_0^2 \rangle_\varphi$ – усредненные по суточному вращению приливные

"выступы", включающие в себя диссипативные слагаемые вследствие полюсного

прилива. Величины μ_p, μ_q имеют смысл удельных моментов сил и характеризуют

суммарные возмущения, приводящие к наблюдаемому движению земного полюса.

Они выражаются через геофизические возмущения χ_x, χ_y , публикуемые МСВЗ.

Для определения вклада геофизических возмущений в исследуемый колебательный процесс система дифференциальных уравнений движения земного полюса записывается в стандартной форме с возмущающими функциями χ_x, χ_y [18-19]. Для численного интегрирования учитывались атмосферные и океанические возмущения как отдельно, так и совместно. Интегрирование проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка [20].

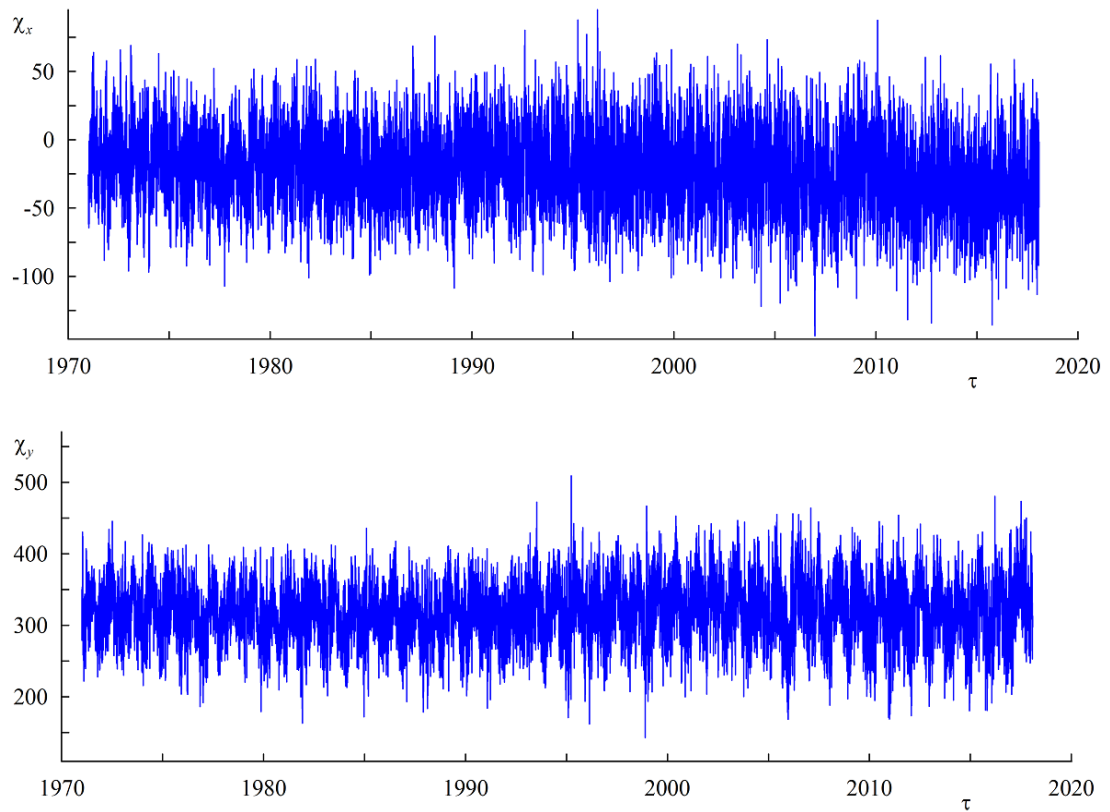


Рис. 3 Совместные возмущения χ_x , χ_y от атмосферы и океана

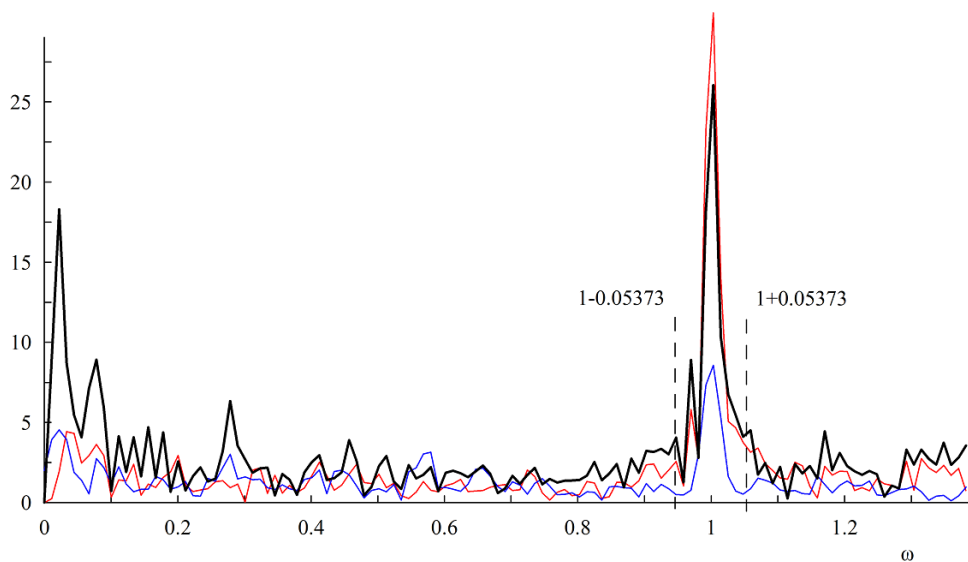


Рис. 4 Сравнение амплитудных спектров геодезического возмущения χ_y и возмущений χ_y от атмосферы (красная линия) и океана (синяя линия)

На рис. 1-2 приводятся графики, учитываемых возмущений χ_x , χ_y от атмосферы и океана. На рис. 3 показаны совместные атмосферно-океанические возмущения.

Роль геофизических возмущений в синхронизации движения земного полюса и прецессии лунной орбиты

Для предварительной оценки вклада геофизических возмущений в формирование колебательного процесса, синфазного с прецессионным движением орбиты Луны на рис. 4 приводятся сравнения амплитудных спектров геодезического, атмосферного и океанического возмущений χ_y . Из графика видно, что рассматриваемый колебательный процесс с комбинационными частотами 1 ± 0.05373 цикл/год атмосферные и океанические возмущения полностью не определяют. Различия между суммами этих гармоник, выделенных из расчетной и наблюдаемой траекторий полюса будут как в амплитуде, так и в сдвиге фазы амплитудной модуляции. Такие же выводы справедливы и для возмущения χ_x . Его график менее читаемый вследствие наложения друг на друга пиков спектров и поэтому он не приводится.

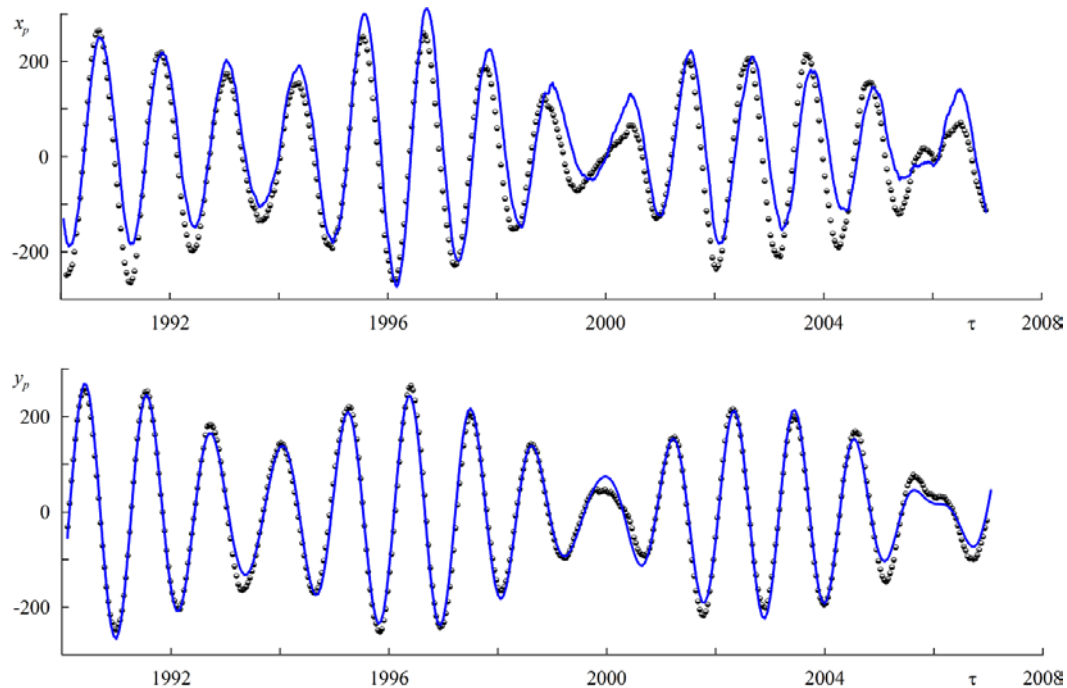


Рис. 5 Колебания земного полюса согласно данным наблюдений и измерений МСВЗ (дискретные данные) в сравнении с рассчитанными колебаниями, вызванными возмущением атмосферы и океана

В результате численного решения дифференциальных уравнений движения земного полюса получены траектории полюса для трех случаев возмущений. Возмущающие функции были заданы таблично, согласно публикуемым данным МСВЗ.

Например, на рис. 5 приводятся колебания расчетного движения земного полюса с учетом совместных возмущений от атмосферы и океана в сравнении с колебаниями его наблюдаемого движения.

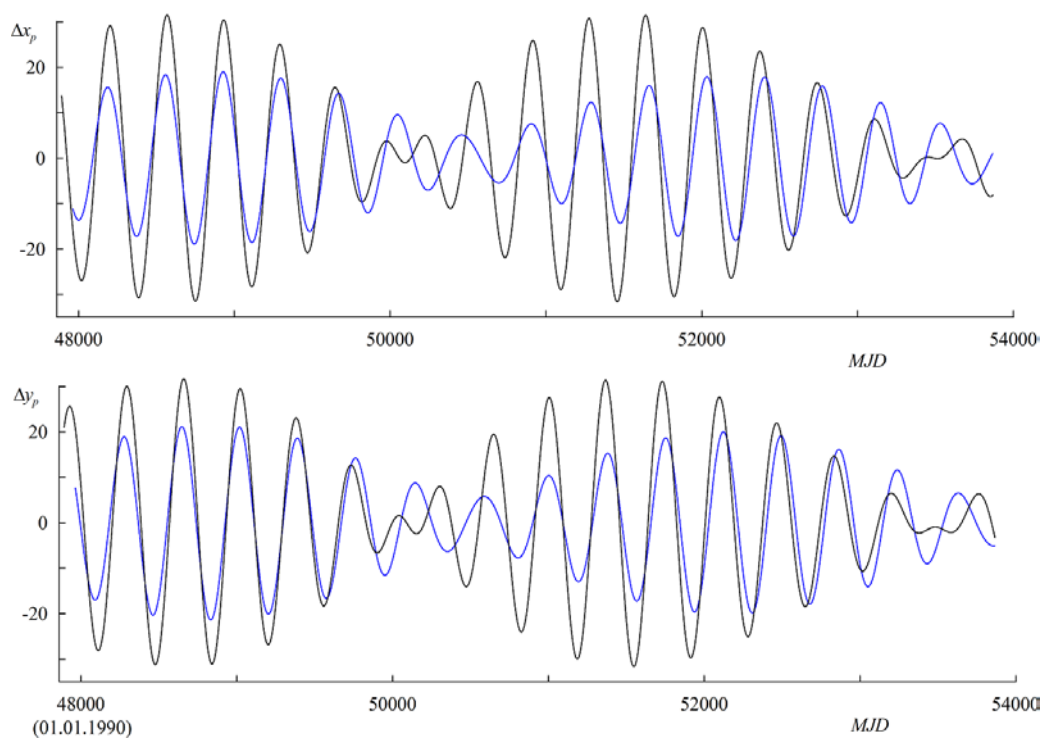


Рис. 6 Исследуемый колебательный процесс земного полюса, выделенный из наблюдаемого движения полюса (черная линия) и его движения, рассчитанного с учетом возмущений от атмосферы и океана (синяя линия)

Для выделения комбинационных гармоник с частотами 1 ± 0.05373 цикл/год из расчетных и наблюдаемых колебаний полюса применялась процедура, предложенная в работе [3]. Используя преобразования координат земного полюса суть которых состоит в исключении двух цикличностей - с чандлеровским и шестилетним периодами, можно получить колебание полюса, синфазное с прецессией лунной орбиты. Затем центрировав, полученную траекторию совершается обратное преобразование. В результате получим искомый колебательный процесс из комбинационных гармоник. На рис. 6 приводится сравнение рассматриваемых колебаний, выделенных из наблюдаемой и

рассчитанной (с учетом атмосферных и океанических возмущений) траекторий земного полюса. Полученный результат подтверждает сделанные предварительные выводы по спектральному анализу. Процесс получился с существенно меньшей амплитудой и со смещенной фазой модуляции, что указывает на возможно более сложную физическую природу этих колебаний и говорит о неполноте учитываемых возмущений.

Выводы

Таким образом, в работе установлено, что более 50% энергии рассматриваемого колебательного процесса, синфазного с прецессией орбиты Луны может быть обусловлено возмущением атмосферы и океана. Колебания с частотами 1 ± 0.05373 цикл/год, вызванные атмосферными и океаническими возмущениями совпадают по фазе с соответствующими колебаниями наблюдаемого движения полюса. Однако, соотношения амплитуд этих гармоник в наблюдаемом движении и движении рассчитанном с учетом геофизических возмущений оказываются разными. Это приводит к сдвигу фазы их амплитудной модуляции.

По крайней мере, треть этого процесса не объясняется учитываемыми в работе возмущениями. Поскольку, возмущения от других подвижных сред оказывают влияние на движение земного полюса значительно меньшее, то таким колебаниям могут быть подвержены различные среды Земли. Тогда этот процесс носит более глобальный характер, а его возбуждение в геосредах может быть обусловлено не столько внутренними, сколько внешними для Земли возмущениями.

Библиографический список

1. International Earth Rotation and Reference Systems Service. IERS Annual Reports.
URL: <http://www.iers.org>.
2. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. - М.: Мир, 1964. 384 с.
3. Марков Ю.Г., Перепелкин В.В., Рыхлова Л.В., Филиппова А.С. Численно-аналитический подход к моделированию осевого вращения Земли // Астрономический журнал. 2018. Т. 95. № 4. С. 317 - 326. DOI: [10.7868/S0004629918040047](https://doi.org/10.7868/S0004629918040047)
4. Zhou Y.H., Salstein D.A, Chen J.L. Revised atmospheric excitation function series related to Earth's variable rotation under consideration of surface topography // Journal of Geophysical Research, 2006, vol. 111, D12108. DOI: [10.1029/2005JD006608](https://doi.org/10.1029/2005JD006608)
5. IERS Special Bureau for the Oceans. URL: https://euler.jpl.nasa.gov/sbo/sbo_data.html
6. Марков Ю.Г., Перепёлкин В.В., Филиппова А.С. Анализ возмущенных чандлеровских колебаний полюса Земли // Доклады РАН. 2017. Т. 474. № 5. С. 563 - 567. DOI: [10.7868/S0869565217050085](https://doi.org/10.7868/S0869565217050085)
7. Barkin M.Yu., Markov Yu.G., Perepelkin V.V., Filippova A.S. Modeling of Earth rotation in the gravitational field of Sun and Moon // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, no. 468 (1). DOI: [10.1088/1757-899X/468/1/012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/468/1/012006)

8. Krylov S.S., Perepelkin V.V., Filippova A.S. Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics: Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer Nature Singapore, 2019, pp. 315 – 331.
9. Климов Д.М., Акуленко Л.Д., Шматков А.М. Разделение и спектральный анализ колебаний земного полюса // Доклады РАН. 2015. Т. 464. № 3. С. 288 - 292.
10. Ву Виет Чунг. Оценка влияния параметров вращения Земли в задаче координатно-временного обеспечения навигационных спутников // Труды МАИ. 2013. № 69. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=43104>
11. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. - М.: Наука. 2002. - 376 с.
12. Климов Д.М., Акуленко Л.Д., Кумакшев С.А. Механическая модель возмущенного движения Земли относительно барицентра // Доклады РАН. 2013. Т. 453. № 3. С. 277 - 281.
13. Кумакшев С.А. Гравитационно-приливная модель колебаний полюсов Земли // Известия РАН. Механика твердого тела. 2018. № 2. С. 48 - 53.
14. Климов Д.М., Акуленко Л.Д., Кумакшев С.А. Основные свойства и особенности движения Земли относительно центра масс // Доклады РАН. 2014. Т. 458. № 5. С. 547 - 550.
15. Schubert G. Treatise on Geophysics, 2007, Amsterdam, Elsevier. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003376643>

16. Zotov L., Bizouard C., Shum C.K. A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale // Geodesy and Geodynamics, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 216 – 222. DOI: [10.1016/j.geog.2016.05.005](https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.05.005)
17. Вэй Ян Сое. Уточненная малопараметрическая модель движения земного полюса // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121106>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-15)
18. Мьо Зо Аунг. О влиянии полюсного прилива на установившееся движение земного полюса // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=121109>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-16)
19. Bizouard C., Remus F., Lambert S., Seoane L., Gambis D. The Earth's variable Chandler wobble // Astronomy and astrophysics, 2011, vol. 526 (13). DOI: [10.1051/0004-6361/201015894](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015894)
20. Zotov L., Bizouard C. On modulations of the Chandler wobble excitation // Journal of Geodynamics, 2012, no. 62, pp. 30 - 34. DOI: [10.1016/j.jog.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.03.010)
21. Ву Виет Чунг. Прогноз возмущенного движения полюса Земли на коротком интервале времени // Труды МАИ. 2013. № 69. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=43147>

On geophysical disturbances impact on the Earth's pole wobbles with the lunar orbit precession frequency

Wai Yan Soe*, Filippova A.S.

*Moscow Aviation Institute (National Research University),
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

**e-mail: waiyan2032015@gmail.com*

Abstract

The article studies the contribution of basic geophysical disturbances (atmospheric and oceanic) to the wobbling process in phase with the lunar orbit precession by the analysis and processing of the NCEP/NCAR data on atmospheric circulation and NASA/JPL data on the ocean angular momentum. For this purpose, numerical integration of the Earth's pole motion equation with account for the kinetic momentum of the atmosphere and ocean angular momentum was performed. Combinational harmonics associated with the wobbling process under consideration were separated as well. As the result of the integrating, the Earth's pole movement accounting for the basic geophysical disturbances was obtained, and contribution of atmospheric and oceanic disturbances to the wobbling process synchronous with the precessive motion of the lunar orbit was determined. Combinational harmonics, being obtained as the combination of the pole wobbling basic harmonics and harmonic with the frequency of the lunar orbit precession, were found.

It was found that more than 50% of the energy of the wobbling process being considered, in-phase with the lunar orbit precession, might be stipulated by the disturbance of the atmosphere and ocean. Wobbling with frequencies of cycle/year, caused by

atmospheric and oceanic disturbances, coincide in phase with the corresponding wobbling of the observed motion of the pole. However, at least one third of this process is not explained by the disturbances being accounted for in the work.

Keywords: Earth's pole, Chandler oscillation, geophysical disturbances.

References

1. *International Earth Rotation and Reference Systems Service. IERS Annual Reports.*
URL: <http://www.iers.org>.
2. Mank U., Makdonal'd G. *Vrashchenie Zemli* (Earth Rotation), Moscow, Mir, 1964, 384 p.
3. Markov Yu.G., Perepelkin V.V., Rykhlova L.V., Filippova A.S. *Astronomicheskii zhurnal*, 2018, vol. 95, no. 4, pp. 317 - 326. DOI: [10.7868/S0004629918040047](https://doi.org/10.7868/S0004629918040047)
4. Zhou Y.H., Salstein D.A, Chen J.L. Revised atmospheric excitation function series related to Earth's variable rotation under consideration of surface topography, *Journal of Geophysical Research*, 2006, vol. 111, D12108. DOI: [10.1029/2005JD006608](https://doi.org/10.1029/2005JD006608)
5. IERS Special Bureau for the Oceans. URL: https://euler.jpl.nasa.gov/sbo/sbo_data.html
6. Markov Yu.G., Perepelkin V.V., Filippova A.S. *Doklady RAN*, 2017, vol. 474, no. 5. pp. 563 - 567. DOI: [10.7868/S0869565217050085](https://doi.org/10.7868/S0869565217050085)
7. Barkin M.Yu., Markov Yu.G., Perepelkin V.V., Filippova A.S. Modeling of Earth rotation in the gravitational field of Sun and Moon, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, no. 468 (1). DOI: [10.1088/1757-899X/468/1/012006](https://doi.org/10.1088/1757-899X/468/1/012006)

8. Krylov S.S., Perepelkin V.V., Filippova A.S. *Advances in Theory and Practice of Computational Mechanics: Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer Nature Singapore, 2019, pp. 315 – 331.
9. Klimov D.M., Akulenko L.D., Shmatkov A.M. *Doklady RAN*, 2015, vol. 464, no. 3, pp. 288 - 292.
10. Vu Viet Chung. *Trudy MAI*, 2013, no. 69. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=43104>
11. Sidorenkov N.S. *Fizika nestabil'nostei vrashcheniya Zemli* (Instabilities physics of the Earth rotation), Moscow, Nauka, 2002, 376 p.
12. Klimov D.M., Akulenko L.D., Kumakshev S.A. *Doklady RAN*, 2013, vol. 453, no. 3, pp. 277 - 281.
13. Kumakshev S.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela*, 2018, no. 2, pp. 48 - 53.
14. Klimov D.M., Akulenko L.D., Kumakshev S.A. *Doklady RAN*, 2014, vol. 458, no. 5, pp. 547 - 550.
15. Schubert G. *Treatise on Geophysics*, 2007, Amsterdam, Elsevier. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003376643>
16. Zotov L., Bizouard C., Shum C.K. A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale, *Geodesy and Geodynamics*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 216 – 222. DOI: [10.1016/j.geog.2016.05.005](https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.05.005)
17. Vei Yan Soe. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121106>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-15](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-15)

18. M'o Zo Aung. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121109>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-16)
19. Bizouard C., Remus F., Lambert S., Seoane L., Gambis D. The Earth's variable Chandler wobble, *Astronomy and astrophysics*, 2011, vol. 526 (13), DOI: [10.1051/0004-6361/201015894](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015894)
20. Zotov L., Bizouard C. On modulations of the Chandler wobble excitation, *Journal of Geodynamics*, 2012, no. 62, pp. 30 - 34. DOI: [10.1016/j.jog.2012.03.010](https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.03.010)
21. Vu Viet Chung. *Trudy MAI*, 2013, no. 69. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=43147>