

УДК 523.3

ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВНОЙ ВОЛНЫ M_f НА ВЫСОКОЧАСТОТНУЮ СОСТАВЛЯЮЩУЮ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2024 г. А. В. Мясников*

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

*E- mail: andrey0405@mail.ru

В работе проведен анализ вариации параметров приливной лунной деклинационной волны M_f в вариации угла вращения Земли (временной ряд UT1–UTC). В качестве исходных данных использовался бюллетень EOP14C04 Международной службы вращения Земли (МСВЗ) и опорных систем International Earth Rotation and Reference Systems (IERS), который содержит данные о параметрах вращения Земли (ПВЗ) с 1962 г. по настоящее время с шагом одни сутки. Показано, что все периодические составляющие вариации амплитуды волны M_f , где основным является период обращения лунных узлов с периодом 18.6 лет, полностью совпадают с соответствующими параметрами волны M_f для деформационного прилива, выделенного из полного прилива, полученного с помощью стандартного пакета ETGTAB. Показан, в качестве примера, прогноз развития волны M_f вращения Земли до 2035 г.

Ключевые слова: угловое вращение Земли, параметры приливной волны, лунный узел, деклинационная волна, эллиптическая волна, сидерический месяц, спектральный анализ, вариация параметров, система отсчета.

Для цитирования: Мясников А.В. Влияние приливной волны M_f на высокочастотную составляющую вариации параметров вращения Земли // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 2. С. 22–27. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_2_22

Введение

Вариация ПВЗ, в частности скорость вращения Земли, отражает как геофизические процессы, происходящие на ее поверхности и глубинных недрах, так и астрономические явления в ближнем космосе. Все перераспределения масс геофизических оболочек Земли и обмена момента импульса между ними влияют на вращение Земли. На перераспределение масс влияют процессы в мантии и ядре, океанические течения, таяние ледников, сезонные циклы атмосферных течений. Как показано в [Сидоренков, 2003], мощность вариации вращения Земли 1014–1015 Вт. При этом энергетика возбуждающих процессов, влияющая на вращение, занимает следующий ряд: атмосферные движения – 1015 Вт, океанические движения – 1014 Вт, потоки тепла из недр Земли – 1013 Вт, сильнейшие землетрясения – 1012 Вт.

Особое место влияния на процесс вращения Земли занимает вариация приливного потенциала под действием Луны и Солнца. Теория лунно-солнечного прилива позволяет построить теоретическую модель приливного потенциала, которая содержит порядка тысячи гармоник [Tamura, 1987; Мельхиор, 1968] с периодами от 6 часов до 18.6 лет. Последнее обстоятельство позволяет считать эту теорию наиболее мощным инструментом в геофизике. Теоретическая модель позволяет с высокой степенью точности построить вариацию фигуры Земли, используя, например, сферически симметричную упругую модель Земли (Preliminary Reference Earth Model, PREM) [Dziewonski, 1981].

И именно в последнее десятилетие к точности астрономических наблюдений, космической навигации и систем глобального позиционирования предъявляются очень высокие требования для расчета матрицы преобразований между земной и небесной системами координат, которая строится на основе ПВЗ.

В 1987 г. Международным астрономическим союзом (МАС) была формально утверждена Международная служба вращения Земли (МСВЗ), как преемница Международного бюро времени (МБВ, 1912 г.), Службы вращения Земли (СВЗ, 1919 г.) и Международного бюро движения полюса (МБДП, 1960 г.). Были внесены рекомендации по формированию новых земной и небесной систем отсчета. Основной задачей МСВЗ является сбор наблюдательных данных ПВЗ с таких технических центров как РСДБ (радиотелескоп со сверхдлинной базой), ЛЛЛ (лазерная локация Луны), ЛЛС (лазерная локация спутников), GPS. Ввод данных с РСДБ в 1970 г. привел к значительному скачку повышения качества данных относительно скорости вращения. В последнее время предлагается метод на базе кольцевого оптического интерферометра [Руденко и др., 2022] за счет эффекта Саньяка [Sagniac, 1914].

В общем случае ориентацию земной системы отсчета относительно небесной задают пять параметров: углы прецессии и нутации $\Delta\epsilon$ (долгота восходящего узла эклиптики), $\Delta\psi$ (наклонение эклиптики) определяют ориентацию оси вращения Земли в инерциальной системе отсчёта МНСО, угол θ , на который повернулась Земля, координаты x_p, y_p – положение мгновенной оси вращения в системе координат, связанной с Землей. Сама матрица пересчета – это комбинация матриц поворотов PN, W, R .

$$R_{crs} = PN(t) \times R(t) \times W(t) \times R_{trs},$$

где R_{crs}, R_{trs} – радиус-вектор точки в небесной и земной системе координат соответственно, $PN(t)$ – прецессия и нутация, $W(t)$ – движение полюсов, $R(t)$ – угловое вращение Земли.

Шкала координированного всемирного времени UTC, реализующая связь атомного времени ТАИ, универсального времени пропорционального углу поворота Земли θ относительно квазаров UT1, была определена в 1961 г. Угол вращения Земли $\theta(T)$ вычисляется по формуле: $\theta(T) = 2\pi (0.7790572732640 + 1.00273781191135448 \cdot T)$, где $T = JDUT1 - 2451545.0$, а $JDUT1$, в свою очередь, из ряда шкалы времени $UT1 = UTC + (UT1 - UTC)$, где UTC и $(UT1 - UTC)$ два ряда исходных данных согласно бюллетеню EOP14C04. Вследствие замедления вращения Земли шкала UT1 отстает от UTC. До 1972 г. МСВЗ вводилась дополнительно 0.1 секунды UTC, если рассогласование превышало эту величину. С 1972 г. было принято решение вносить только 1 секунду в конце суток (по всемирному времени) 30 июня или 31 декабря так, чтобы рассогласование между UT1 и UTC превышало 0.9 секунды. Последний раз такая добавочная секунда была внесена 31.12.2016 г., с тех пор скорость вращения Земли существенно поменяла свой характер.

Анализ данных

В конце 2023 г. МСВЗ на сайте IERS опубликовал бюллетень EOP14C04, данных ПВЗ с 1 января 1962 г. с шагом 24 часа. В том числе ряд данных $DUT1 = (UT1 - UTC)$, первая производная которого характеризует скорость вращения Земли (LOD). Именно этот временной ряд был использован в качестве выделения приливной компоненты в скорости вращения Земли. Из временного ряда $UT1 - UTC$ были устранены все добавочные секунды, включая 0.1 секунды до 1972 г. (см. выше). Для дальнейшего анализа можно использовать первую производную ряда $UT1 - UTC$, которая уже есть в готовом виде в бюллетене EOP14C04 как ряд LOD, но в данной работе используются только значения угла поворота Земли. Вековой тренд, который появляется после устранения добавочной секунды, устранялся с помощью симметричного нерекурсивного импульсного фильтра с конечной областью отклика (ИКО-фильтр), который не дает сдвига по времени, что будет важно для дальнейшего анализа. Таким образом, были удалены вековой тренд и все низкочастотные составляющие с периодом более 27 лет.

На рис. 1 в логарифмическом масштабе показан амплитудно-частотный спектр полученного сигнала в диапазоне периодов 10–10000 суток. В этом частотном диапазоне сигнал формируется четырьмя узкими полосами: годовая S_a и полугодовая S_{sa} – составляющие, эллиптическая приливная волна

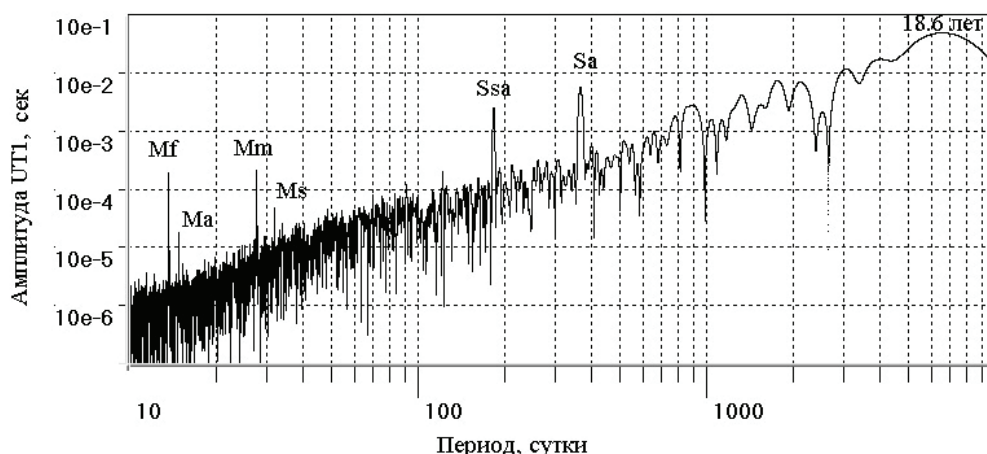


Рис. 1. Результат спектрального анализа ряда UTC – (UTC – UT1) в диапазоне периодов 10–10000 суток. Волны M_f , M_a , M_m , M_s – лунный прилив, S_{sa} , S_a – сезонные колебания различных параметров, влияющих на ПВЗ, в том числе полугодовые и годовые приливные солнечные волны

M_m ($T = 27.55$ суток или аномалистический месяц), деклинационная приливная волна M_f ($T = 3.66$ суток). Кроме того, в диапазон волны M_m входит эвекционная волна M_s ($T = 31.812$ суток, влияние Солнца на орбиту Луны), а в диапазон M_f входит волна M_a ($T = 14.76$ суток, Синодический месяц). Все обозначения заимствованы из теории земных приливов [Мельхиор, 1968]. С определенной степенью точности можно выделить и период 18.6 года, который соответствует периоду движения лунных узлов. В данной работе анализируется самый высокочастотный диапазон в этой спектральной области, это диапазон волн M_f , M_a . Данный диапазон полностью определяет характер сигнала в интервале 10–20 суток.

На рис. 2 показан результат спектрального анализа ряда UTC – (UTC – UT1) в линейном масштабе в области приливной волны M_f в диапазоне 13–15 суток. В этом масштабе хорошо видно, что спектр имеет тонкую структуру, и кроме волны M_a волна M_f имеет ещё две боковых волны. Боковая волна с периодом 13.77 суток определяет амплитудную модуляцию волны M_f с периодом нутации 18.6 лет или периодом движения лунных узлов. Боковая волна с периодом 13.63 суток определяет период модуляции M_f с периодом порядка 75 лет. Кроме того, при внимательном рассмотрении спектра видно, что сама волна M_f расщепляется на две волны. Даже наличие этих гармоник с высоким отношением сигнал/шум показывает сложную структуру сигнала в этом диапазоне.

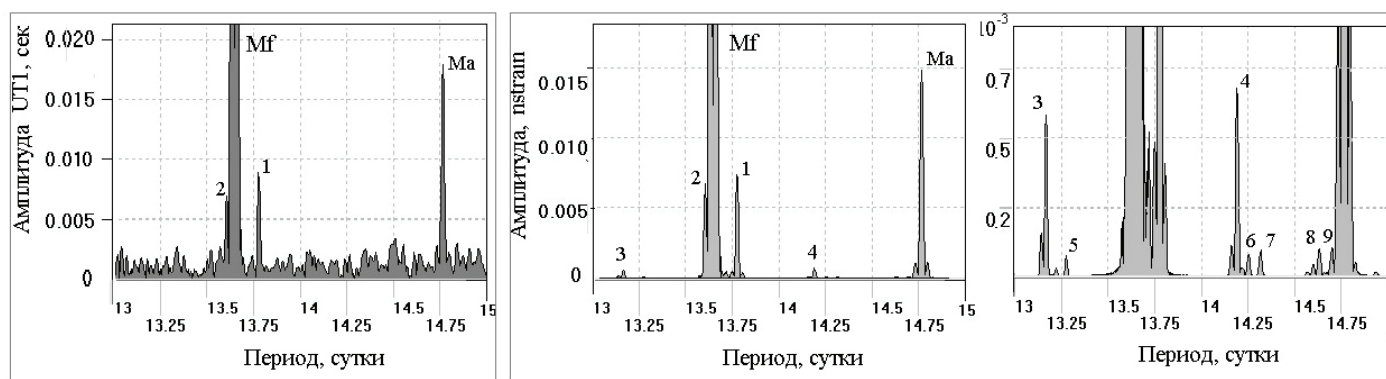


Рис. 2. Левая панель: результат спектрального анализа ряда UTC – (UTC – UT1) ПВЗ в диапазоне периодов 13–15 суток и амплитуды до 0.022 сек. Волна 1 имеет период $T = 13.77$ суток, волна 2 – период $T = 13.63$ суток.

Правая панель: спектр теоретического прилива в диапазоне амплитуд 0–0.02 $nstrain$ и 0–0.0008 $nstrain$ (деформационная составляющая, $Strain$), полученного с помощью стандартного пакета ETGTAB. Периоды волн: 3 – 13.17, 4 – 14.1, 5 – 13.27, 6 – 14.25, 7 – 14.32, 8 – 14.63, 9 – 14.69 суток

Результат

На рис. 3 (верхняя панель) изображено два графика вариации амплитуды гармоники M_f ряда UTC – (UTC – UT1) ПВЗ и соответствующей вариации приливной деклинационной волны M_f

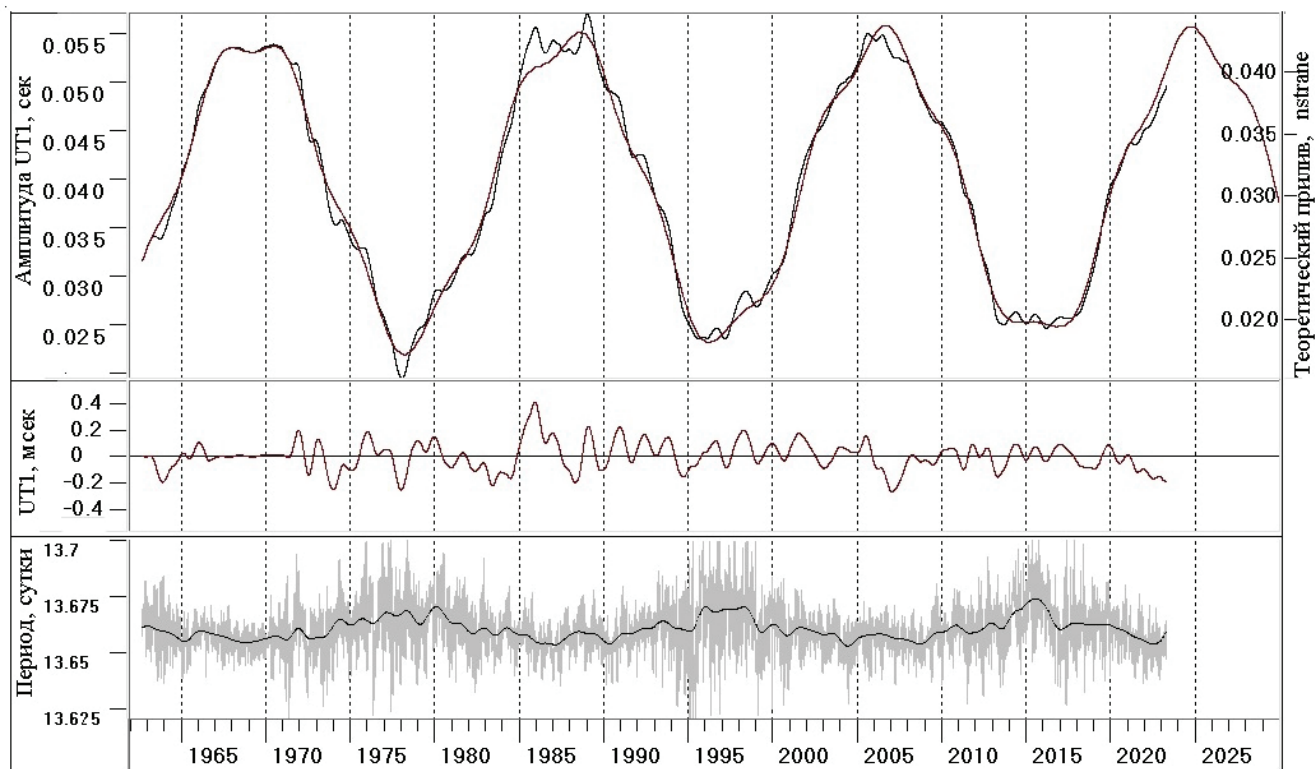


Рис. 3. Верхняя панель: вариация амплитуды гармоники M_f ряда UTC – (UTC – UT1) ПВЗ с 1962 г. по настоящее время. Вариация приливной деклинационной волны M_f (деформационная составляющая прилива) с 1962 по 2030 гг. Средняя панель: неприливный остаток вариации амплитуды ряда UTC – (UTC – UT1) ПВЗ в диапазоне периодов 13–15 суток. Нижняя панель: вариация периода гармоники M_f ряда UTC – (UTC – UT1) ПВЗ

(деформационная составляющая прилива) с 1962 г. Данные графики строились с плавающим окном 500 суток с шагом 1 день.

Основной период вариации составляет 18.6 года, что уже предварительно наблюдалось при спектральном анализе. Но этот период не определяет полностью характер поведения этой вариации. Обратимся снова к рис. 2. На левой панели в разном масштабе изображен амплитудный спектр теоретического лунно-солнечного прилива в том же самом диапазоне периодов. Действительно, спектры, насколько представляется возможным определить уровень шума ПВЗ, совпадают по волнам M_f , Ma (1, 2 на рис. 2), что полностью подтвердилось на графике рис. 3. Таким образом, данный диапазон периодов вариации UT1 имеет исключительно приливную природу. Рассматривая спектр теоретического сигнала более подробно (рис. 2, правая панель), можно выделить еще минимум семь гармоник, которые должны присутствовать в сигнале UT1.

На нижней панели рис. 3 приведена оценка вариации периода непосредственно самой гармоники M_f . Эта вариация также имеет период движения лунных узлов.

Выводы

Представляет интерес остаток после удаления из сигнала UT1 лунно-приливной составляющей. До 1972 г., до ввода МСВЗ процедуры использования данных РСДБ, точность определения параметров (UTC – UT1) не выходила за пределы точности приливной составляющей, как это видно на рис. 3. Поэтому разность ряда вариации угла вращения Земли и деформационной приливной составляющей в этот период практически отсутствует. Но таким образом, при дальнейшем уменьшении ошибки определения ПВЗ эта разница (см. рис. 3, средняя панель) приобретает особое значение, так как определяется только такими эффектами как вариации параметров самой Земли.

Вариация амплитуды UT1 в диапазоне периодов 13–15 суток имеет довольно тонкую структуру. Как показывает спектр теоретического прилива, в этом диапазоне присутствуют еще по крайней мере 7 гармоник с периодами волн: 3 – 13.17, 4 – 14.1, 5 – 13.27, 6 – 14.25, 7 – 14.32, 8 – 14.63, 9 – 14.69. суток.

Теоретический прилив является отличной моделью поведения UT1 в диапазоне 13–15 суток. На рис. 3, в качестве примера, показан график поведения этой приливной составляющей до 2030 г.

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

- Мельхиор П. Земные приливы. М. : Мир, 1968. – 483 с.
- Руденко В.Н., Орешкин С.И., Руденко К.В. Измерение глобальных гравиинерциальных эффектов кольцевым лазерным интерферометром // УФН. 2022. Т. 192. № 9. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039128>
- Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат. 2003.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Plan. Int. 1981. Vol. 25. P. 297–356.
- Tamura Y. A harmonic development of the tide-generating potential // Bulletin d'Information Marees Terrestres, Bruxelles. 1987. No 99. P. 6813–6855.
- Sagniac G.J. Effet tourbillonnaire optique. La circulation de l'éther lumineux dans un interférographe tournant // J. Phys.Theor. Appl. 1914. Vol. 4 (1). P. 177–195. <https://doi.org/10.1051/jphysap:019140040017700>

THE INFLUENCE OF TIDAL WAVE M_f ON THE HIGH-FREQUENCY COMPONENT OF VARIATIONS IN THE EARTH ROTATION PARAMETERS

© 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 parameters of the tidal lunar declination wave M_f in the variation of the Earth rotation angle (UT1–UTC time series). The source data was bulletin EOP14C04 of the International Earth's Rotation and Reference Systems (IERS), which contains data on the parameters of the Earth rotation (ER) from 1962 to the present in one-day increments. It is shown that all periodic components of the variation of the M_f parameters, where the main one is the orbital period of the lunar nodes with a period of 18.6 years, completely coincide with the corresponding parameters of the M_f wave for the deformation tide, isolated from the total tide obtained using the standard ETGTAB package. Shown, as an example, is the forecast for the development of the M_f wave of the Earth rotation until 2035.

Keywords: angular rotation of the Earth, tidal wave parameters, lunar node, declination wave, elliptical wave, sidereal month, spectral analysis, parameter variation, reference system.