

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ J_2 МЕТОДОМ ССА

Л.В. Зотов^{1,2}, Е.Ю. Балакирева¹

¹Высшая школа экономики, МИЭМ, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

Методом сингулярного спектрального анализа (ССА) исследован временной ряд изменений коэффициента J_2 разложения гравитационного поля Земли по данным лазерной локации спутников (ЛЛС) с 1976 по 2016 г. Выявлены годовое, полугодовое 10 и 20-летние колебания, а также тренд, напоминающий часть колебания с возможным периодом ~60 лет и минимумом около 2005 г. Изменения коэффициента J_2 сопоставляются с другими геофизическими процессами, обсуждаются возможные влияния на Чандлеровское колебание полюса Земли.

Введение

Гравитационное поле Земли отражает характер распределения масс в её оболочках, оно тесно связано с фигурой планеты, её внутренним строением. В эпоху космической техники гравитационное поле Земли измеряется с высокой точностью методами лазерной локации спутников и специальными гравиметрическими миссиями (GRACE, GOCE). Большой интерес представляют колебания первых коэффициентов разложения гравитационного потенциала Земли, связанные с различными глобальными процессами на Земле и в космосе, в частности, с перераспределением масс атмосферы и океана в годовом цикле и под действием приливных возмущений. В данной работе представлен анализ коэффициента J_2 за последние 40 лет наблюдений.

J_2 по данным ЛЛС

Мы использовали временной ряд коэффициента разложения гравитационного потенциала J_2 с 1976 по 2011 г [Long-term...], дополненный рядом с 2011 по 2016 г [Description for...] с месячным шагом, полученный по данным лазерной локации спутников. На основе измерений расстояний до спутников LAGEOS и др. [Krasinsky, 2011; Bloßfeld et al., 2015] с установленными на борту лазерными отражателями определяются координаты спутников и возмущения в их орбитах, связанные с коэффициентами гравитационного поля Земли. Это позволяет определить не только вариации коэффициента J_2 [Cheng et al., 2013], но и изменения в положении геоцентра [Xiaoping et al., 2012] и другие эффекты в первых гармониках потенциала [Satellite..., 2009]. Специализированные гравиметрические миссии, такие как GRACE, менее чувствительны к первым гармоникам и используются, в основном, для изучения компонент гравитационного поля более высоких степеней и порядков. При обработке данных GRACE значения коэффициентов Стокса $C_{20} = -J_2/\sqrt{5}$ заменяют более точными, полученными из ЛЛС наблюдений (рис. 1) [Зотов и др., 2016].

Результаты сингулярного спектрального анализа

Нами выполнен сингулярный спектральный анализ (ССА) временного ряда вариаций ΔJ_2 после вычитания среднего значения $\langle J_2 \rangle = 1082.636 \cdot 10^{-6}$ за период с 1976 по 2016 г. Метод ССА основан на сингулярном разложении траекторной матрицы вложения временного ряда и подробно описан в [Кашкин, Рублева, 2007; Зотов и др., 2016; Зотов, 2010; Миллер, Воротков, 2015]. Он позволяет разделить исходный ряд на компоненты различной периодичности, вбирающие основную его изменчивость, и отфильтровать шумы. Основным параметром алгоритма ССА является параметр задержки L , определяющий размерность пространства вложения. Этот параметр подбирается экспериментально с учетом некоторых эвристических соображений [Миллер, Воротков, 2015].

Ниже представлены результаты сингулярного спектрального анализа временного ряда ΔJ_2 для параметра $L = 18$ лет (216 при месячном шаге данных). Сравнение производилось также для $L = 5, 10, 12$ и 20 лет и был сделан вывод об оптимальности $L=18$ лет для разделения компонент в нашем случае. Для первых сингулярных чисел была проведена группировка. Так, в главную компоненту ГК 1 были объединены сингулярные числа (СЧ) 1 и 2, вобравшие в себя годовое колебание. Полугодовое колебание, представленное СЧ 6 и 7, было объединено в ГК 2. ССА позволил также выделить 20-летнюю (ГК 3, СЧ 5), 8-летнюю (ГК 4, СЧ 9), 10-летнюю (ГК 5, СЧ 8) компоненты изменчивости и тренд (ГК 6, СЧ 3 и 4). Они представлены на рис. 2. Компоненты, соответствующие сингулярным числам 10 и выше, в нашем исследовании не учитывались, они считались составляющими шума.

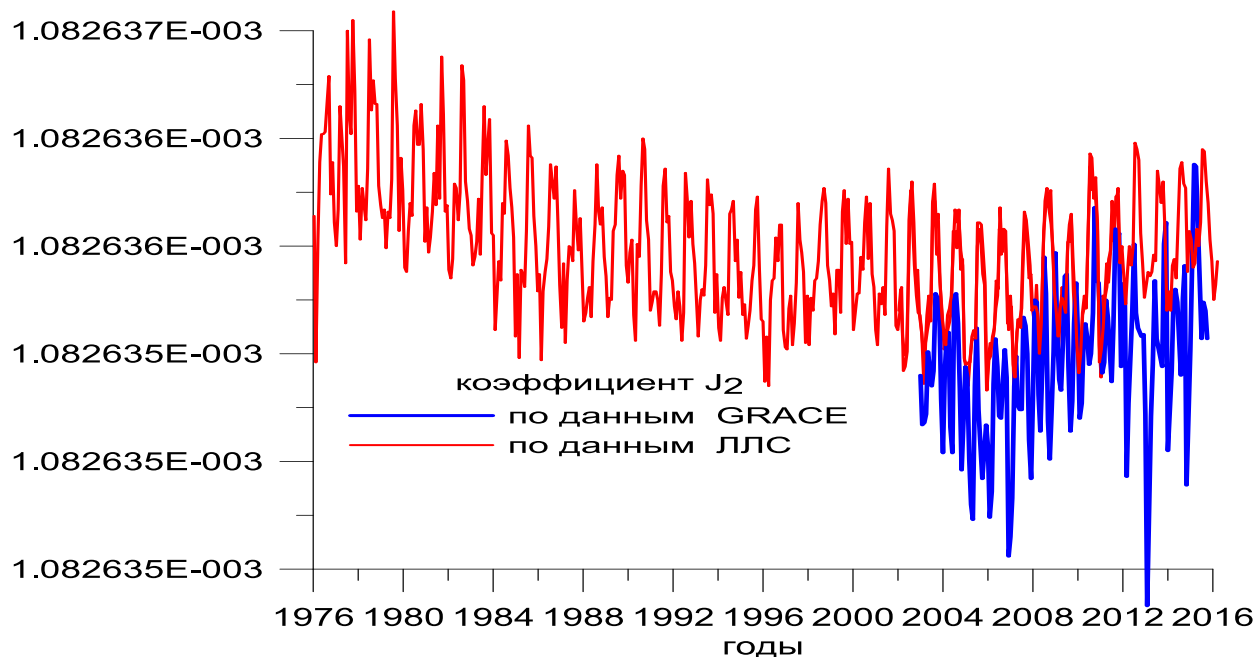


Рис. 1. Исходный ряд коэффициента J_2 , полученный по данным SLR с 1976 по 2016 год в сравнении со значениями на основе данных GRACE с 2003 г

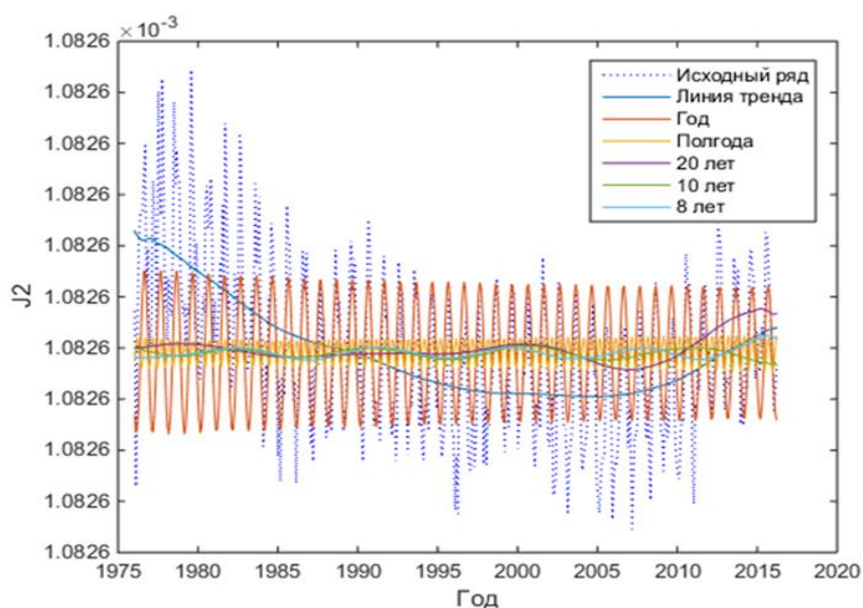


Рис. 2. Выделенные главные компоненты на фоне исходного ряда ΔJ_2

Убедиться в том, что сумма первых шести главных компонент хорошо аппроксимирует ряд вариаций ΔJ_2 и практически полностью выбирает его изменчивость можно, взглянув на рис. 3, где слева представлен анализируемый ряд и сумма первых шести главных компонент. Справа на рис. 3 показана компонента, соответствующая шумовому СЧ 10. В начале спутниковых измерений в 1970-е годы результаты были менее точными, чем в конце периода наблюдений, в них было больше шумов.

Анализ выделенных главных компонент

Наиболее выраженными компонентами изменчивости ΔJ_2 являются ГК 1 (годовая) и ГК 2 (полугодовая). Они представлены на рис 4, а периодограммы (амплитудные спектры) этих компонент представлены на рис 5.

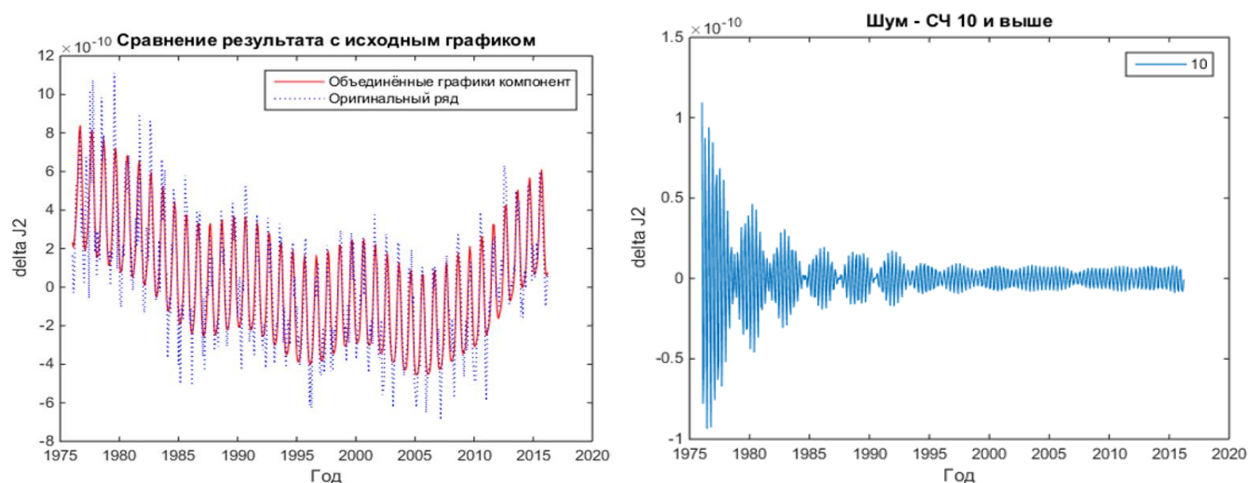


Рис. 3. Сопоставление выделенных компонент и исходного ряда ΔJ_2 (за вычетом среднего) слева. Компонента, соответствующая шумовому сингулярному числу 10 справа.

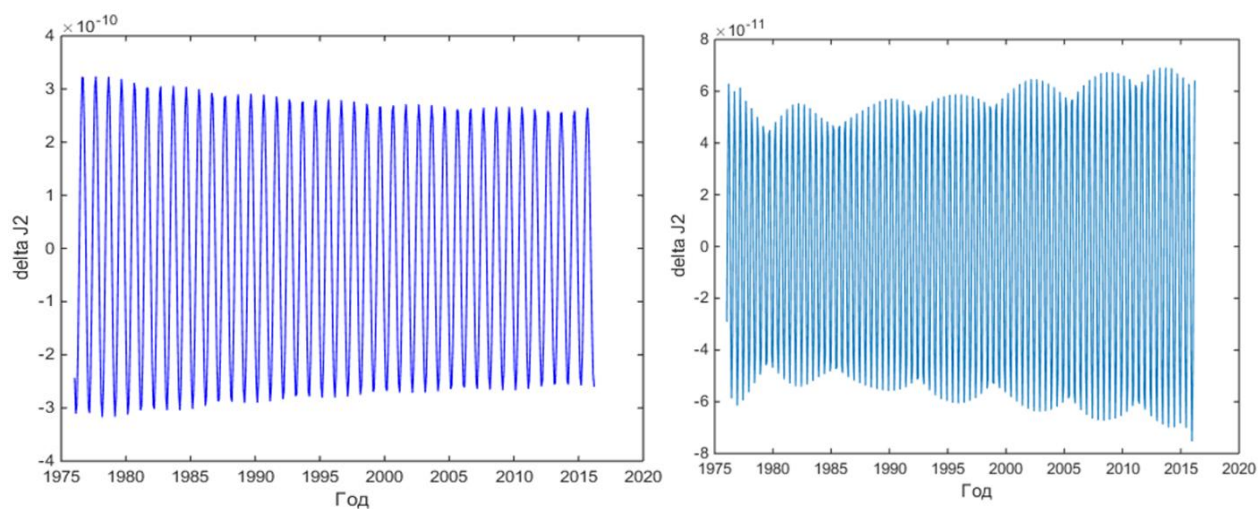


Рис. 4. Графики годовой компоненты ГК 1 (слева) и полугодовой ГК 2 (справа)

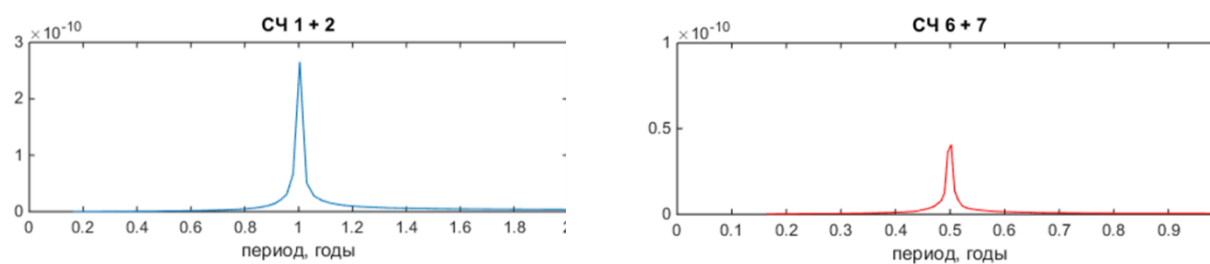


Рис. 5. Графики амплитудного спектра ГК 1 (слева) и ГК 2 (справа)

Видно, что ГК 1 имеет период год и амплитуду около $3 \cdot 10^{-10}$, ГК 2 имеет период полгода и амплитуду около $5 \cdot 10^{-11}$. На рис 6 эти компоненты представлены на меньшем интервале времени. Видно, что на протяжении года ГК 1 достигает минимума в январе-феврале, максимума – в июле-августе (рис. 6, слева). ГК 2 достигает минимума в мае и октябре, максимума – в феврале и июле (рис. 6, справа). Это связано с сезонностью перераспределения масс в океане и атмосфере Земли [Cheng et al., 2013; Xiaoping et al., 2012].

На рис. 7 и 8 представлены 20-летняя ГК 3 и 10-летняя ГК 4 компоненты и их спектры. Компонента ГК 3 (слева) достаточно нестабильна. Как и ГК 4 она сильно возрастает к правому краю интервала, что может являться следствием краевого эффекта. При общей малости амплитуды 20-летней компоненты (порядка $5 \cdot 10^{-11}$) она выделяется методом ССА. В работе [Cheng et al., 2013]

проводился анализ ряда J_2 на наличие гармоник с периодом 18.6 лет, её амплитуда оказалась схожа с амплитудой выделенной нами ГК 3. В методе ССА не проводится априорного подбора частоты. Но квази-20-летняя ГК 3 вполне может соответствовать гармонике, с периодом прецессии узлов лунной орбиты 18.6 года. В этом цикле максимальные склонения Луны изменяются от 29° до 18° , что влияет на амплитуду прилива и вполне может сказываться на сжатии планеты, а как следствие, на коэффициенте J_2 .

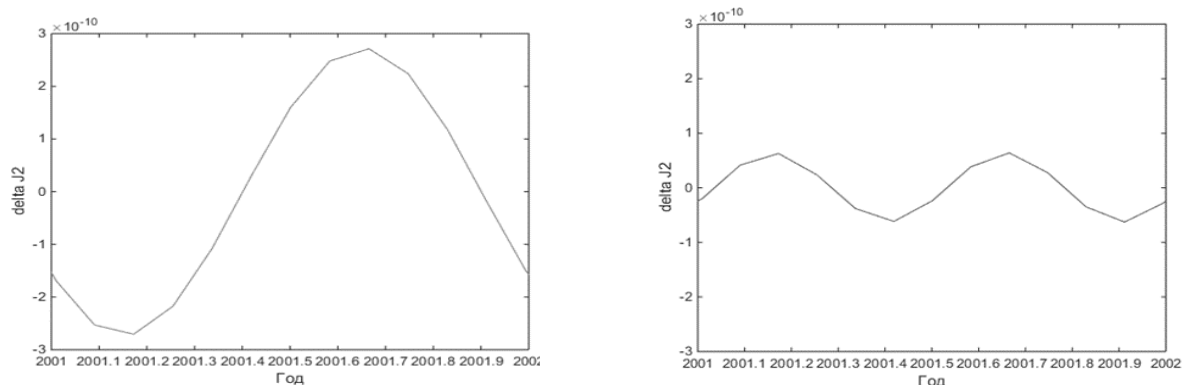


Рис. 6. Колебания ГК 1 (слева) и ГК 2 (справа) с 2001 по 2002 гг

Компонента ГК 4 (рис. 7, 9 справа) имеет период около 8 лет. Минимумы этой компоненты наблюдались в 1987, 1995, 2004 и 2011 годах, максимумы – в 1991, 1999 и 2008 г. Данная компонента может быть связана с модуляцией прилива под влиянием движением перигея лунной орбиты. Период этого движения составляет 8.85 года [Сидоренков].

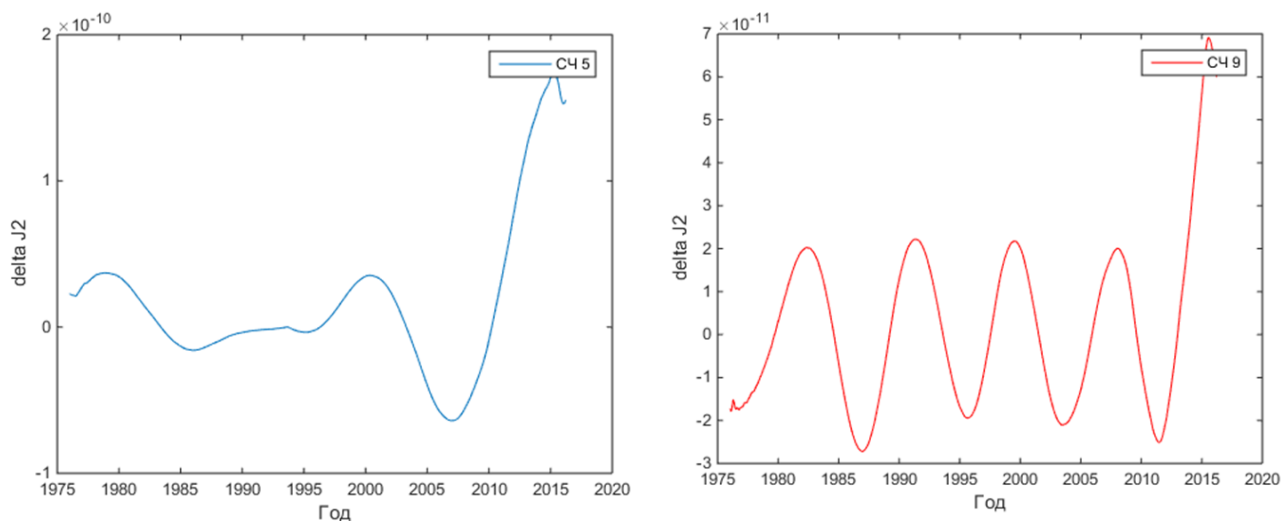


Рис. 7. Графики компонент ГК 3 (слева) и ГК 4 (справа)

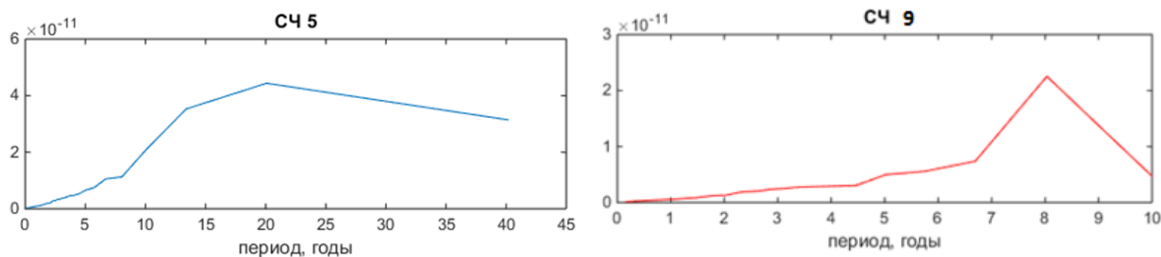


Рис. 8. Графики амплитудного спектра ГК 1 (слева) и ГК 2 (справа)

Для выделенной компоненты ГК 5 (рис. 10) Фурье-анализ показал период около 10 лет. Мы не стали группировать ее с ГК 4 из-за некоторого отличия периодов. Возможно ГК 4 и ГК 5 имеют

единую природу, но разделились по разным СЧ. ГК 5 может быть также связана с полупериодом прецессии орбиты Луны (9.3 года) или с процессами в океане, влияющими на сжатие планеты.

Заметим, что два минимума (1986, 1996) и два максимума (1989, 2000) компоненты ГК 5 неплохо совпадают с годами максимумов и минимумов Солнечной активности. Однако два колебания ГК 5 на краях (максимумы 1982 и 2012) несколько расходятся с циклом солнечной активности по фазе (максимумы 1979, 2015). В ряде работ [Keeling, Whorf, 1997; Basil..., 2009; Macias et al., 2014; Герман, Голдберг, 1981] выдвигаются предположения о связи циклов солнечной активности и колебаний климата на Земле. Косвенно это может сказаться и на перераспределении масс и вызвать вариаций в J_2 . Однако современные взгляды на связь климата и солнечной активности предполагают возможность влияния лишь на периодах более 50-100 лет.

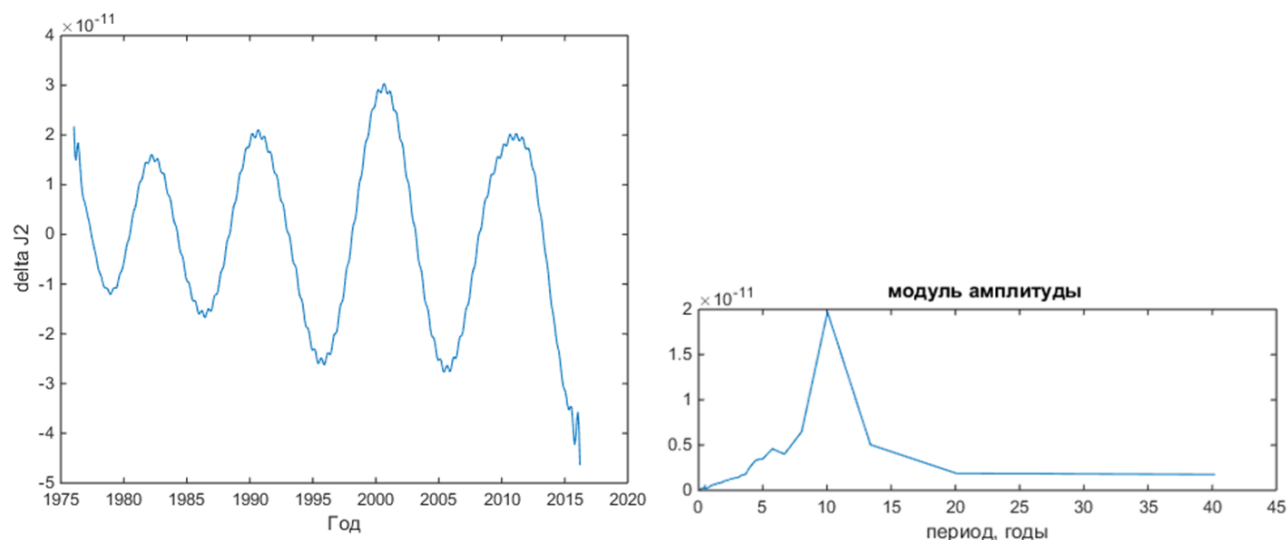


Рис. 10. График компоненты ГК 5 и ее спектра

Наиболее интересна, на наш взгляд, компонента тренда ГК 6, представленная на рис. 11. Данный тренд можно аппроксимировать параболой, но, возможно, он является частью незавершенной периодической компоненты с периодом больше, чем длительность спутниковых измерений. На графике видно, что с начала наблюдений (1976 г) шёл спад этой составляющей гравитационного поля, в начале 2000-х она достигла минимума (абсолютный минимум был достигнут в начале 2005 года), после чего начался стремительный рост. Если предположить, что в 70-е годы данная компонента находилась в максимуме, то её период может быть оценён в 60-70 лет.

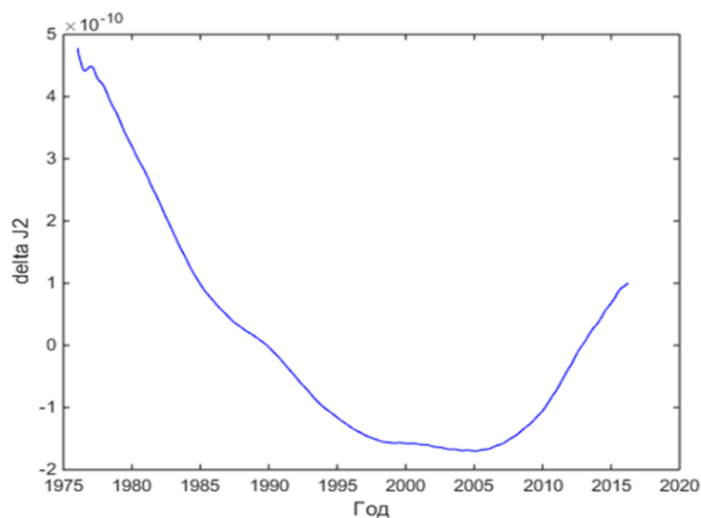


Рис. 11. График компоненты тренда ГК 6

Интерес представляет тот факт, что подобная 60-летняя изменчивость присутствует также в огибающей Чандлеровского движения полюса Земли и длительности суток LOD [4, 9] с

экстремумами в 1970-е и 2000-е годы. В колебаниях глобальной температуры на Земле также выделяют 70-ти летнюю периодичность, идущую в противофазе с длительностью суток LOD и связанную с многолетним атлантическим колебанием [Last decade's..., 2014; Macias et al., 2014]. Если предположить, что выделенная ГК 6 действительно представляет часть 60-летнего колебания, идущего в фазе с климатическими изменениями и вариациями во вращении Земли, то это может помочь прояснить механизм таких колебаний.

О влиянии изменений J_2 на частоту Чандлеровского колебания

Известно, что изменения момента инерции Земли должны приводить к изменениям Чандлеровской частоты f_c нутации земной оси (период $T \approx 433$ суток) согласно формуле [Lowrie, 2011]:

$$f_c = \frac{\Omega}{2\pi} \left(\frac{C-A - \Omega a^5 k / 3G}{A + \Omega a^5 k / 3G} \right),$$

где $\Omega = 7.292\,115 \cdot 10^{-5}$ рад/с – средняя угловая скорость вращения Земли, C , A – главные моменты инерции, a – экваториальный радиус, G – гравитационная постоянная, k – число Лява.

Поскольку $J_2 = (C-A)/Ma^2$, где M – масса Земли [Пантелеев, 2001], считая, что меняется лишь величина осевого момента инерции C , получаем для оценки изменений Чандлеровского периода:

$$\Delta T = \frac{\Delta J_2}{\langle J_2 \rangle} T = \frac{4 \cdot 10^{-10}}{1082.636 \cdot 10^{-6}} T = 3.695 \cdot 10^{-7} T$$

Для $T = 433$ суток и амплитуды колебаний сопоставимого с амплитудой выделенного тренда ГК 6 ($4 \cdot 10^{-10}$), получаем для изменения периода Чандлеровского колебания величину порядка $\Delta T = 15.67$ секунд.

Таким образом, величины изменений J_2 в 60-летнем цикле должны менять период Чандлера на считанные секунды. Это не позволяет объяснить модуляции амплитуды Чандлеровского колебания полюса (с минимумами в 1930-х и 2010-х) [Zotov et al., 2015; Миллер, Воротков, 2015]. Теория, которая могла бы связать долговременные изменения J_2 и квази-60-летние колебания во вращении Земли требует дальнейшей разработки.

Заключение

Применение сингулярного спектрального анализа к временному ряду колебаний коэффициента J_2 для Земли позволило выделить как ранее известные [Cheng et al., 2013], так и обнаружить новые закономерности. В частности, были выделены компоненты с периодами 0.5 года, 1 год, 8, 10 и 20 лет. Эти составляющие колебаний гравитационного поля связываются с сезонными и декадными перераспределениями масс океана, атмосферными колебаниями и воздействием лунных приливов.

Важным результатом является обнаружение тренда, с возможным периодом около 60 лет, который также может быть связан с динамикой Чандлеровского колебания полюса Земли, её вращением и климатическими индексами. Для выяснения механизма, вызывающего сходные колебания в этих геофизических индексах требуются теоретические исследования.

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 16-05-00753.

Литература

1. Герман Дж., Голдберг Р. Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат. 1981.
2. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ. 2004. 76 с.
3. Зотов Л.В., Бизуар К., Шам С.К. О возможной взаимосвязи вращения земли и изменений климата в последние 150 лет. // Труды Всероссийской астрометрической конференции «ПУЛКОВО – 2015» Известия ГАО в Пулкове. № 223. 103 с.
4. Зотов Л., Фролова Н., Шам С.К. Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России. Природа, РАН. № 5. 2016. 3 с.
5. Зотов Л.В. Теория фильтрации и обработка временных рядов: Курс лекций. М: Физический факультет МГУ. 2010.
6. Миллер Н.О., Воротков М.В. Моделирование чандлеровского движения полюса. // Труды Всероссийской астрометрической конференции «ПУЛКОВО – 2015». Известия ГАО в Пулкове. № 223. 125 с.

7. *Кашкин В.Б., Рублева Т.В.* Применение сингулярного спектрального анализа для выделения слабо выраженных трендов // Известия ТПУ. 2007. № 5.
8. *Пантелеев В.Л.* Физика Земли и планет: Курс лекций. М: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет. 2001.
9. *Сидоренков Н.С.* О важности наблюдений за эффектами приливных колебаний скорости вращения Земли. <http://meteoweb.ru/articles/sidorenkov.pdf>
10. Basil Copeland and Anthony Watts, Evidence of a lunisolar influence on decadal and bidecadal oscillations in globally averaged temperature trends // WUWT. 2009. <https://wattsupwiththat.files.wordpress.com/2009/05/elsi2n-wpics2.pdf>
11. *Cheng, M., B. D. Tapley, and J. C. Ries.* Deceleration in the Earth's oblateness, // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. № 118. P. 740–747.
12. Long-term 30-day estimates of C20 from up to 8 SLR satellites. ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/slr/degree_2/Long_term/C20_1976_2011.txt
13. Description for UT/CSR monthly C20 RL-05 time series from SLR. ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/slr/degree_2/C20_RL05.txt
14. *L. Zotov, Ch. Bizouard, C.K. Shum.* About possible interrelation between Earth rotation and Climate variability on a decadal time-scale? // Journal of Geodesy and Geodynamics. China. 2016
15. Last decade's slow-down in global warming enhanced by an unusual climate anomaly // JOINT Research center. 2014. <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/climate-anomaly-causes-global-warming-slow-down>
16. *Keeling C.D., Whorf T.P.* Possible forcing of global temperature by the oceanic tides.// Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1997. V. 16, № 94. P. 8321-8328.
17. *G.A.Krasinsky.* Variations of the coefficient J_2 of geopotential, and the dynamical Love number k_2^d from the analysis of laser ranging to LAGEOS 1 and LAGEOS 2. // Cornell University Library. 2011
18. *Mathis Bloßfeld, Horst Müller, Michael Gerstl, Vojtech Štefka, Johannes Bouman, Franziska Göttl, Martin Horwath.* Second-degree Stokes coefficients from multi-satellite SLR, J Geod. 2015. № 89. P. 857-871.
19. *Nicola Scafetta.* Does the Sun work as a nuclear fusion amplifier of planetary tidal forcing? A proposal for a physical mechanism based on the mass-luminosity relation, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. № 81-82. P. 27-40.
20. *Macias D, Stips A, Garcia-Gorriz E.* Application of the Singular Spectrum Analysis Technique to Study the Recent Hiatus on the Global Surface Temperature Record. PLoS ONE 2014. V. 9, № 9.
21. *W. Lowrie.* A students guide to geophysical equations. Gambridge. 2011.
22. Satellite Laser Ranging and Earth Science // NASA International Laser Ranging Service. 2009. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/docs/slrover.pdf>
23. *Xiaoping W., Jim Ray, Tonie van Dam.* Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications // Journal of Geodynamics. 2012. № 58. P. 44-61.