

УДК 528.2

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.43434

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЙЛЕРОВСКОЙ СВОБОДНОЙ НУТАЦИИ ЗЕМЛИ

© И. И. Гладких, М. Б. Капочкина, В. Ю. Зорин

Используя геоцентрические системы координат, в том числе WGS-84, вынужденно отождествляют геометрический центр Земли с центром её масс. В результате сравнения данных об изменении формы геоида с использованием спутниковых технологий и соответствующих измерений на береговых пунктах выявлена Эйлеровская свободная нутация. Исследовано периодические и эпизодические смещение центра масс относительно геометрического центра Земли

Ключевые слова: Эйлеровская свободная нутация, Чандлеровский цикл, WGS-84, ошибки орбитальных характеристик

Geometric center of the Earth is forcedly identified to the center of its mass using geocentric coordinate system including the WGS-84. Euler free nutation is revealed in result of data comparison on change of the form of the geoid using satellite technologies and corresponding measurements on the coastal areas. Periodic and episodic displacement of the center of mass relative to the geometric center of the Earth is investigated

Keywords: Euler free nutation, Chandler cycle, WGS-84, errors of orbital characteristics

1. Введение

В 1758 г. Леонард Эйлер разработал теорию вращения твердой Земли вокруг оси главного полярного момента инерции C , при условии отсутствия моментов внешних сил. Частота Эйлеровской прецессии $\omega_E = (C-A) \cdot g_0 / A$, где A – экваториальный момент инерции, g_0 (имеет размерность (сутки)⁻¹) – связан с несовпадением оси вращения Земли с её осью инерции [1]. В работе [2] указано, что независимо от гравитационного взаимодействия с другими телами, Земля испытывает свободную, Эйлеровскую нутацию. Колебания возникают из-за того, что ось вращения Земли слегка наклонена к оси наибольшего момента инерции. Полный момент количества движения остается постоянным и по величине и по направлению, а Земля движется так, что полюс описывает на ее поверхности круг с центром в точке пересечения оси наибольшего момента инерции с поверхностью Земли. Полная энергия вращения больше, чем энергия вращения относительно оси. Избыток энергии вращения приводит к стремлению тела восстановить состояние симметричного вращения и создает эффективный гироскопический момент. Рассматривая его как внешний момент, вызывающий вынужденную прецессию, получают угловую скорость свободной нутации жесткой твердой Земли: $\omega_E = -N\omega$, где N – динамическое сжатие, ω – угловая скорость вращения Земли. Теоретическое значение $T_E = 2\pi/\omega_E = 305$ суток. Автор указывает, что, вариации широты с частотой ω_E на практике не выявлены [2].

2. Постановка проблемы

Целью исследования является исследование свободной Эйлеровской нутации. Для достижения поставленной цели необходимо:

1) использовать высокоточные измерения формы геоида, выполняемые с дискретностью, позволяющей исключить ограничения, возникающие в связи с пороговой частотой Найквиста. Таким требованиям отвечают альтиметрические измерения топографии морской поверхности;

2) выбрать район, наименее подверженный возмущениям топографии морской поверхности динамическим факторам (течениям, приливным процессам) и выполнить расчеты энергетического спектра данных альтиметрических измерений;

3) оценить достоверность расчетов энергетического спектра на частоте Эйлеровской свободной нутации и определить амплитуду колебаний с Эйлеровской частотой свободной нутации.

3. Литературный обзор

Известно [3], что малые колебания вектора угловой скорости в референц-системе координат содержат составляющую с периодом приблизительно 430–440 звездных суток (Чандлеровский цикл). Значительное отличие этого периода от периода прецессии Эйлера 305 суток, для недеформируемой фигуры Земли, было частично объяснено на основе модели деформируемой Земли [3]. Рассматриваемое движение принято называть свободной нутацией деформируемой Земли. В работе [4] указано, что траектория движения мгновенного полюса имеет вид спирали. Самое большое удаление мгновенного полюса от среднего не превышает 15 м. Закручивание и раскручивание траектории объясняется тем, что он совершает два периодических движения: свободное колебание, но с периодом не 305 суток, а около 430–440, и вынужденное колебание с годовым периодом. Свободное движение полюса происходит почти по круговой траектории (максимальные значения радиуса (9 м)). Вынужденное движение происходит вдоль эллипса, величины больших полуосей эллипса колеблются в пределах от 3.4 до 2.7 м, малых полуосей – от 2.5 до 1.8 м, эксцентриситетов – от 0.15 до 0.46. Восточные долготы большой полуоси изменяются от 205° до 145° в. д. В работах [5, 6] на основе анализа астрономических наблюдений приведены данные о периодичности движения полюсов Земли. Установлено, что на фоне Чандлеровского цикла, имеющего «размытый пик» с максимальной амплитудой на частоте 0,85 год⁻¹ (период 430 суток) обо-

значен пик на частоте, соответствующей частоте Эйлеровской нутации (период 305 суток). Показано, что амплитуда Эйлеровской нутации исключительно мала по сравнению с Чандлеровским циклом.

В работе [7] изложены факты, подвергающие сомнению предположения о тождественности Чандлеровского цикла, предвычисленной Эйлером свободной нутации Земли. Высказано предположение о том, что изменения широт наземных пунктов с Чандлеровским циклом обусловлены причинами, не связанными с нутацией. По информации автора Чандлеровский период существенно больше Эйлеровского, что обусловлено отличиями от твердого тела, характеристиками упругости и деформируемости Земли. Утверждение о том, что Чандлеровский цикл является периодом свободной нутации, приводит к двум парадоксальным следствиям [8]. Если принять обсуждаемое предположение как истинное, то динамическое сжатие должно составлять $1/427$, что отличается от фактической величины $1/305$, а полярный момент инерции Земли должен быть больше, чем у однородного шара того же радиуса, что подразумевает уменьшение плотности Земли с глубиной [8]. Тезис о фактическом отсутствии нутации Земли с Чандлеровским периодом подтверждается исследованиями, изложенными в работе [9]. Можно обсуждать и гипотезу о том, что Чандлеровские колебания представляют собой смещения твердой внешней подвижной оболочки Земли относительно её внутренних сфер [5, 10].

3. Результаты выполненных исследований

Данные для расчетов заимствованы из открытой международной базы данных спутниковых альтиметрических измерений уровня Мирового океана. В работе [11] на основании данных измерений уровня Черного моря в Одесском заливе спутниковыми и контактными измерениями были изучены различия их спектральных характеристик. Отличия состоят в том, что данные контактных измерений уровня моря включают гармонику с периодом 14,6 месяцев (Чандлеровский цикл), а спутниковые измерения гармонику с периодом 10,3 месяца (Эйлеровская свободная нутация). Контактные измерения должны фиксировать как вертикальные движения морской поверхности, так и вертикальные движения отчетной поверхности геодинамиче-

ские движения. Если гармоника 305 суток не проявлена в спектре береговых измерений, значит она физически не существует. Для проверки наличия периода Эйлеровской нутации в спектре вертикальных колебаний поверхности геоида нами были выполнены дополнительные исследования формы геоида Черного моря. При выборе точки измерения вариаций положения геоида Черного моря нами была учтена карта морской средне климатической динамической топографии [12] и выбран район с «нулевыми» значениями данного параметра (43° с. ш. и 30° в. д.). Был сформирован временной ряд длиной в 15 лет с дискретностью измерений 10 суток и рассчитан энергетический спектр (рис. 1).

На спектре проявились периодичности 365 и 305 суток, что подтверждает результаты, изложенные в монографии [11]. С целью определения степени достоверности выявленных периодичностей была рассчитана интегрированная периодограмма. Результаты расчета показали, что спектральные оценки являются статистически значимыми, превышают 95 % доверительный интервал. Выполнена фильтрация Эйлеровской свободной нутации путем применения полосно-заграждающего фильтра (полоса 320–290 суток) и последовательного применения низкочастотного фильтра (пороговое значение 290 суток) и низкочастотного фильтра (пороговое значение 320 суток).

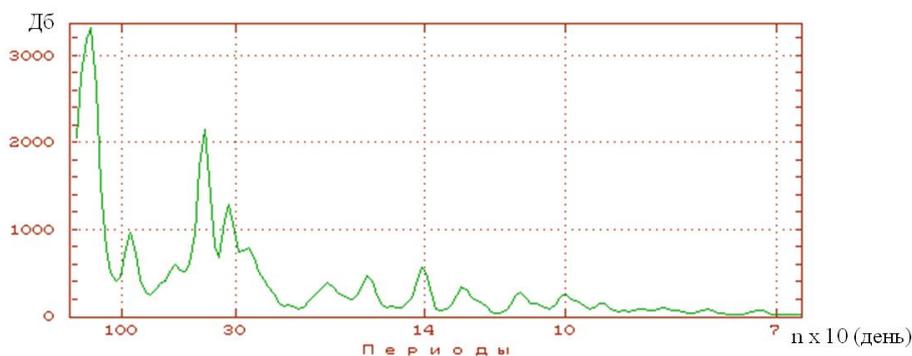


Рис. 1. Спектр изменения геоида Черного моря, измеренного альтиметрическими методами в точке с координатами 43° с. ш. и 30° в. д.

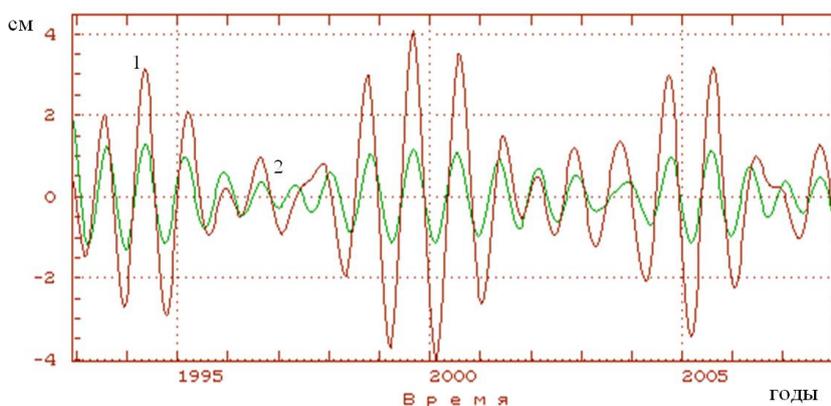


Рис. 2. Результаты фильтрации данных изменения отметки геоида Черного моря 1 – методом узкополосной фильтрации; 2 – методом последовательного применения низкочастотной и высокочастотной фильтрации

Показано, что для периода свободной Эйлеровской нутации амплитуда колебаний поверхности геоида Черного моря не является стабильной во времени. Максимальные амплитуды перемежаются минимальными амплитудами с периодом 5–6 лет. Природа этих модуляций требует специального изучения. В работе [13] указано, что гармоника с периодом 305 суток и годовая гармоника с периодом 365,25 суток синхронизируются раз в шесть лет, что сопровождается увеличением интегрированной амплитуды совместного колебательного процесса. По мнению автора [13], с этим периодом должны меняться полярный и экваториальный моменты инерции Земли, а следовательно должна меняться скорость вращения Земли вокруг своей оси. Изменения угловой скорости вращения Земли действительно происходят с периодом около шести лет [10, 13].

В дальнейшем необходимо определиться, следует ли шестилетнюю амплитудную модуляцию 305-суточной гармонике формализовать в виде ошибки определения орбитальных характеристик, вычисленных в геоцентрических системах координат. Основанием для такого предположения можно считать наличие новой глобальной годовой моды геодеформаций, связанной со смещениями ядра Земли [14]. Соответствие указанного процесса годовой гармонике, показанной на рис. 1 требует дополнительных исследований. Основанием для исследований является несоответствие физ годовых гармоник климатической и геодинамической природы.

5. Апробация результатов исследований

С целью проверки достоверности существования возможных сантиметровых отклонений центра масс от геометрического центра Земли в геоцентрической системе WGS-84 были привлечены данные изменения во времени значений коэффициента J_2 (параметра сплюснутости Земли) [15]. В 1998 году было зафиксировано аномальное изменение знака J_2 с отрицательного значения на положительное, вызвавшие скачкообразное изменение угловой скорости вращения Земли. Одновременно с этим альтиметрические данные показали синхронизированное вздымание и опускание поверхности геоида с разных сторон планеты (рис. 3).

Беспрецедентные за историю наблюдений изменения формы геоида могут быть объяснены смещением центра масс относительно геометрического центра Земли. В связи с тем, что данные спутниковых измерений не подтверждены контактными измерениями, аномальные изменения формы геоида в антиподальных районах Мирового океана гипотетически могут быть рассмотрены как результат изменения орбитальных характеристик спутников, использующих геоцентрическую систему координат при смещении центра масс Земли относительно её геометрического центра.

6. Выводы

Исследования изменчивости формы геоида позволяют сформулировать следующие положения:

– свободная Эйлеровская нутация с периодом 305 суток реально существует и соответствует теоретически вычисленной частоте;

– её амплитуда (до 8 см) фиксируется только в данных спутниковых измерений изменений формы геоида, что дает основание предположить, что эйлеровская нутация фиксируется только по изменениям положения центра масс относительно геометрического центра Земли. Важно понимать, что в модели «твердой» Земли изменения положения центра масс тождественны соответствующим изменениям положения земной поверхности и поверхности геоида в Мировом океане, а в модели «жидкой» Земли изменения положения центра масс могут практически не сопровождаться изменениями положения земной поверхности и поверхности геоида в Мировом океане;

– полученные результаты могут привести к уточнению орбитальных характеристик спутниковых систем и оценок изменения положения центра масс в используемой геоцентрической системе координат WGS-84;

– Чандлеровский цикл не может ассоциироваться со свободной Эйлеровской нутацией и имеет иную природу.

Литература

1. Учение о фигуре Земли и его значение для понимания ее внутреннего строения. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/tutorials/vikulin/chapter2.pdf>
2. Стейси, Ф. Физика Земли [Текст] / Ф. Стейси. – М.: Мир, 1972. – С. 37–43.
3. Акуленко, Л. Д. Возмущенное вращение Земли [Электронный ресурс] / Л. Д. Акуленко, С. А. Кумакшев, А. М. Шматков. – Режим доступа: http://www.ipmnet.ru/~kumak/Earth/eop_theory_rus.pdf
4. Глава 2. Вращение Земли. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://vkvuz.ru/books/ch_02.pdf
5. Пономарева, О. В. Изучение связи периодического движения географических полюсов с периодами обращения планет [Текст]: IV междунар. конф. / О. В. Пономарева // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. – с. Паратунка, Камчатский край, 2007. – С. 190–194.
6. Федоров, Е. П. Движение полюса Земли [Текст] / Е. П. Федоров, А. А. Корсунь, С. П. Майор и др. – Киев: Наукова думка, 1972. – 264 с.
7. Гришаев, А. А. Периодическое движение полюсов земли: реальность или иллюзия? [Электронный ресурс] / А. А. Гришаев. – Режим доступа: <http://newfiz.narod.ru/pvz1.htm>
8. Авсюк, Ю. Н. Возможное объяснение процесса изменения широт [Текст] / Ю. Н. Авсюк // ДАН. – 1980. – Вып. 254, № (4). – С. 834–837.
9. Викулин, А. В. Чандлеровское колебание полюса и сейсотектонический процесс [Текст] / А. В. Викулин, А. Н. Кролевец // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 6. – С. 996–1009.
10. Учитель, И. Л. Геодинамика. Основы динамической геодезии [Текст] / И. Л. Учитель, В. С. Дорофеев, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин. – Одесса: Астропринт, 2008. – 311 с.
11. Михайлов, В. И. Современные изменения уровня Черного моря как основа стратегии строительного освоения побережий: монография [Текст] / В. И. Михайлов, В. С. Дорофеев, В. Н. Ярошенко, Б. Б. Капочкин, Н. В. Кучеренко. – Одесса: Астропринт, 2010. – 165 с.
12. Kubryakov, A. A. Mean dynamic topography of the black sea, computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data [Text] / A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny // Ocean Science Discussions. – 2011. – Vol. 8, Issue 2. – P. 701–722. doi: 10.5194/osd-8-701-2011

13. Частота пульсаций Земли [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.proza.ru/2013/01/13/977>
14. Blewitt, G. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected / G. Blewitt // Science. – 2001. – Vol. 294, Issue 5550. – P. 2342–2345. doi: 10.1126/science.1065328
15. TINYPIC [Electronic resource] / Available at: <http://i29.tinypic.com/71oa6q.png>

References

1. Uchenie o figure Zemli i ego znachenie dlja ponimaniya ee vnutrennego stroeniya. Available at: <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/tutorials/vikulin/chapter2.pdf>
2. Steisy, F. (1972). Fizika Zemli. Moscow: Mir, 37–43.
3. Akulenko, L., Kumakshev, S., Shmatkov, A. Vozmushhennoe vrashhenie Zemli. Available at: http://www.ipmnet.ru/~kumak/Earth/eop_theory_rus.pdf
4. Glava 2. Vrashhenie Zemli. Available at: http://vkvuz.ru/~books/ch_02.pdf
5. Ponomareva, O. V. (2007). Izuchenie svyazi periodicheskogo dvizheniya geograficheskikh poljusov s periodami obrashheniya planet, IV mezhdunarodnaja konferencija Solnechno-zemnye svyazi i fizika predvestnikov zemletrjasenij. Paratunka, Kamchatskij kraj, 190–194.
6. Fedorov, E., Korsun, A., Maior, S. et. al. (1972). Dvizhenie poljusa Zemli. Kiev: Naukova dumka, 264.

7. Grishaev, A. Periodicheskoe dvizhenie poljusov zemli: real'nost' ili illuzija? Available at: <http://newfiz.narod.ru/pvz1.htm>
8. Avsyuk, N. (1980). Vozmozhnoe objasnenie procesa izmenjaemosti shirot, DAN, 254 (4), 834–837.
9. Vikulin, A., Krolevets, A. (2001). Chandlerovskoe kolebanie poljusa i sejsotektonicheskij process. Geologija i geofizika, 42 (6), 996–1009.
10. Uchytel, I. (2008). Geodinamika. Osnovy dinamicheskoy geodezii. Odesa: Astroprint, 311.
11. Mikhailov, V. (2010). Sovremennye izmeneniya urovnja Chernogo morja kak osnova strategii stroitel'nogo osvoeniya priberezhij. Odesa: Astroprint, 165.
12. Kubryakov, A. A., Stanichny, S. V. (2011). Mean dynamic topography of the black sea, computed from altimetry, drifters measurements and hydrology data. Ocean Sci. Discuss, 8 (2), 701–722. doi: 10.5194/osd-8-701-2011
13. Frequency deformations of Earth. Available at: <http://www.proza.ru/2013/01/13/977>
14. Blewitt, G. (2001). A New Global Mode of Earth Deformation: Seasonal Cycle Detected. Science, 294 (5550), 2342–2345. doi: 10.1126/science.1065328
15. TINYPIC. Available at: <http://i29.tinypic.com/71oa6q.png>

Дата находження рукопису 20.05.2015

Гладких Игорь Иванович, доктор технических наук, профессор, кафедра гидрографии и морской геодезии, Одесская национальная морская академия, ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029
E-mail: gladkykh@ukr.net

Капочкина Маргарита Борисовна, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр, воинская часть 1113 МО Украины, ул. Фонтанская дорога, 4, г. Одесса, Украина, 65009
E-mail: margo-92@ukr.net

Зорин Вячеслав Юрьевич, Начальник управления научно-исследовательского центра, Воинская часть 1113 МО Украины, ул. Фонтанская дорога, 4, г. Одесса, Украина, 65009

УДК 656.13

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.44337

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЕЛАСТИЧНОСТІ ПОПИТУ НА ПОСЛУГИ ПРИМІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

© Т. М. Григорова, Ю. О. Давідіч, В. К. Доля

Досліджено закономірності зміни попиту на послуги приміського пасажирського автомобільного транспорту в залежності від вартості. Наведені результати обробки опитування пасажирів з приводу зміни плати за проїзд на обраному маршруті. Побудовано криву еластичності попиту на користування приміським автобусним транспортом при трудових та культурно-побутових пересуваннях. Визначено рівноважний тариф на послуги приміського автомобільного транспорту

Ключові слова: транспортне обслуговування, приміське сполучення, обсяг перевезень, тариф, попит, еластичність

The regularity of changes in demand for suburban passenger road transport, depending on the value, is investigated. The results of the survey of passengers about changes of fare on the chosen route are given. It is built the curve of elasticity of demand for suburban bus transport use in labor and cultural and social movements. The equilibrium tariff for suburban road transport is defined

Keywords: transport service, suburban transport, traffic volume, tariff, demand, elasticity

1. Вступ

У сучасних умовах реформування економіки транспортна система України змушена бути адаптована до роботи в ринкових умовах. Приміський па-

сажирський транспорт не в усіх напрямках своєї господарської діяльності є прибутковим. Задача заохочення пасажирів набуває все більшої актуальності у зв'язку з необхідністю підвищення конкурентоспро-