

Анализ свободной нутации ядра Земли на основе обработки РСДБ-наблюдений

© Р. М. Урунова, С. Л. Курдубов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Целью данной работы является изучение временного ряда поправок к координатам небесного полюса Земли за период 1979–2022 гг., полученных по РСДБ-наблюдениям. Считается, что такой ряд может быть описан эмпирической моделью свободной нутации ядра Земли. Действующие модели свободной нутации ядра Земли основываются на одной частоте, которая соответствует периоду около 430 дней, с переменной фазой и амплитудой. Недостатком данных моделей является то, что ошибка прогноза резко возрастает при вычислении значений поправок за пределами интервала наблюдений, на котором эти модели и были построены. Поэтому было принято решение построить собственную эмпирическую модель, которая позволяла бы предсказывать значения для любого момента времени независимо от интервала, на котором будут определены ее параметры. Исходными данными для этой модели является ряд поправок к координатам небесного полюса, полученный после вторичной обработки РСДБ-наблюдений программным пакетом QUASAR.

В процессе исследования был использован спектральный анализ для выделения частотных характеристик изменений координат небесного полюса. Так как полученный временной ряд поправок является неравномерным, то для его анализа была построена периодограмма Ломба-Скаргла. Спектр полученного ряда сравнивался со спектром равномерного временного ряда $f_{\text{in}}^{\text{in}}$, предоставляемого Международной службой вращения Земли и систем отсчета. Чтобы сравнение спектров равномерного и неравномерного рядов было корректным, была построена периодограмма Ломба-Скаргла также и для равномерного временного ряда, так как она применима в обоих случаях. Полученные спектры мы рассматривали как спектр биения, возникшего при наложении двух гармоник. Частоты этих гармоник были определены из периодограммы. Чтобы определить соответствующие им амплитуды, был применен линейный метод наименьших квадратов, а для уточнения этих значений был применен нелинейный метод наименьших квадратов.

В результате мы получили эмпирическую модель свободной нутации ядра Земли, которая включает в себя набор коэффициентов, вычисленных на основе обработанных данных. Полученные гармоники соответствуют периодам –422 и –441 день. Полученная модель может быть использована для коррекции предсказанных рядов поправок к координатам небесного полюса.

Ключевые слова: свободная нутация ядра, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, параметры вращения Земли.

Контакты для связи: Урунова Рената Маратовна (rm.urunova@iaaras.ru).

Для цитирования: Урунова Р. М., Курдубов С. Л. Анализ свободной нутации ядра Земли на основе обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 50–55.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.50-55>

Analysis of the Earth's Free Core Nutation Based on VLBI Observations Processing

R. M. Urunova, S. L. Kurdubov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The goal of this research is to study changes in the corrections to the coordinates of Earth's celestial pole for the period 1979 to 2022, as obtained using VLBI observations. It is supposed that these changes can be described by an empirical model of the Earth's free core nutation. The current model is based on a single frequency, which corresponds to a period of approximately –430 days, with variable phase and amplitude. The disadvantage of this model is that it predicts correction values only within a limited observation interval on which they were originally based. Therefore, the decision was made to develop a new empirical model that would allow predictions for any moment in time, regardless of the interval on which it was computed. The input data for this model consists of a series of corrections to the coordinates of the celestial pole obtained after secondary processing of VLBI observations using the QUASAR software package.

During the research, spectral analysis was employed to extract the frequency characteristics of the changes in the celestial pole coordinates. Since the obtained time series of the corrections is uneven, the Lomb-Scargla periodogram was constructed for its analysis. The spectrum of the series obtained was compared with the spectrum of the uniform time

series of the Earth Orientation Parameters (EOP) of finals, as provided by International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). The spectral analysis of a uniform series included the construction of a Fourier spectrum, which can only be applied to a uniform series. To make the comparison of the spectra of the uniform and uneven series correct, the Lomb-Scargle periodogram was constructed, since it is applicable in both cases. We considered the spectra obtained as the spectrum of the beating that occurred when two harmonics were superimposed. To determine the frequencies and amplitudes of these harmonics, the linear least squares method was applied, and then the nonlinear least squares method was used to refine the calculated values. Next, we compared the resulting model with the generally accepted single-frequency model having variable phase and amplitude. The Lambert model was used as such a model.

As a result, we derived an empirical model of the Earth's free core nutation, which includes a set of coefficients calculated based on the processed data. The harmonics obtained are described by periods of -422 and -441 days. This model can be utilized to correct predicted correction series for the coordinates of the celestial pole.

Keywords: Free Core Nutation, Very Long Baseline Interferometry, earth orientation parameters.

Contacts: Renata M. Urunova (rm.urunova@iaaras.ru).

For citation: Urunova R. M., Kurdubov S. L. Analysis of the Earth's free core nutation based on VLBI observations processing // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 70. P. 50–55.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.50-55>

Введение

Свободная нутация ядра — Free core nutation (FCN) — это явление во вращении Земли, при котором твердое внутреннее ядро планеты колеблется независимо от мантии и других слоев Земли. Колебательное движение вызвано гравитационными взаимодействиями между ядром Земли и Луной, а также Солнцем. FCN является одним из видов нутации, которая представляет собой нерегулярное движение, накладываемое на прецессию и осевое вращение Земли. FCN характеризуется периодом около -430 дней. Знак минус указывает, что движение является ретроградным. Оно подвержено влиянию различных факторов, включая распределение масс внутри Земли, свойства ядра и гравитационные силы, действующие со стороны внешних тел. Поэтому изучение FCN позволяет получить информацию о внутренних слоях Земли, включая ядро и мантию, а также о взаимодействиях между этими двумя компонентами.

Знание характеристик FCN помогает более точно предсказывать изменение вращения Земли, что имеет практическое значение для навигации, геодезии и других областей, связанных с определением положения на Земле. Также изучение FCN может внести определенный вклад в прогнозирование сейсмической активности.

В настоящее время прецессия и нутация Земли описывается моделью IAU2000A (Международного астрономического союза ([Mathews et al., 2002](#))), принятой в качестве стандартной. Исследование FCN с учетом модели IAU2000A позволяет выявить дополнительные мелкомасштабные колебания и вариации в поведении свободной нутации ядра Земли, которые не учитываются в стандартной модели. Путем сравнения экспериментальных данных с предсказаниями модели можно уточнить параметры и коэффициенты модели, а также проверить ее точность и применимость.

В данной работе рассматриваются наблюдения, выполненные с помощью метода РСДБ, который обладает высокой разрешающей способностью

для обнаружения явления свободной нутации ядра Земли и к тому же включает в себя долгосрочные наблюдения, выполненные на глобальной сети станций.

РСДБ-наблюдения — единственная технология, которая позволяет определить все 5 параметров вращения Земли (ПВЗ): Всемирное время, поправки к координатам небесного полюса и координаты земного полюса. В данной работе нас интересуют поправки к координатам небесного полюса (Celestial Pole Offsets, CPO). Эти поправки являются несогласованием между наблюдаемыми данными и моделью прецессии и нутации. Далее эти поправки будут представлены как ΔX и ΔY . Изменения этих параметров за все время РСДБ-наблюдений содержат некоторую периодическую компоненту, которая описывает явление свободной нутации ядра Земли.

Изучением FCN в последние годы занимались многие авторы ([Gottano et al., 2015](#); [Karbon et al., 2020](#); [Lambert, 2009](#); [Malkin, 2016](#); [Nurul Huda et al., 2020](#); [Rosat et al., 2017](#); [Triana et al., 2021](#); [Zhu et al., 2021](#)). Все они основывались на наблюдениях с использованием РСДБ. При этом исследователи обычно полагались на данные, предоставляемые различными международными центрами обработки IVS и IERS.

В данной работе мы сосредоточимся на двух статьях ([Zhu et al., 2021](#); [Malkin, 2016](#)). Эти исследования представляют особый интерес, поскольку именно в них подробно рассмотрены различные ряды CPO и выполнен анализ предложенных моделей FCN.

Представление координат небесного полюса

Изучаемый ряд поправок к координатам небесного полюса (CPO) можно представить ([Malkin, 2016](#)) в следующем виде:

$$CPO = FCN + T + P + S + N,$$

где T — сумма трендовых компонент (низкочастотные вариации, вызванные неточностью прецессионной модели, немоделированным движением

ем источника или метеорологическим фактором); P — сумма гармонических компонент, вызванных неточностью нутационной модели; S — сумма систематических ошибок; N — измерительный шум.

Динамику жидкого ядра внутри Земли на масштабах обрабатываемых наблюдений можно аппроксимировать (Zhu et al., 2021) как невязкий поток с равномерной завихренностью и граничными условиями в виде эллипсоида. В этом случае поток напоминает равномерное вращение твердого тела вокруг вектора угловой скорости.

Ориентация этого вектора во времени определяется уравнением Лиувилля аналогично вращению мантии. При наблюдении из инерциальной системы отсчета этот вектор представляет собой смещение относительно оси вращения мантии. Данное вращение под воздействием возмущений можно рассматривать как обобщенный случай вращения в динамике флюидов, соответствующий инерционной моде вращения внутри полости (Земли) с жидкостью. Это явление вызывает резонансные эффекты в амплитудах нутации. Период FCN привязан к значению резонанса негидростатической модели Земли и приблизительно равен значению -430 дней. Таким образом, в большинстве работ, посвященных FCN, используют эмпирическую модель с одной частотой и изменяемыми амплитудой и фазой следующего вида:

$$\begin{cases} \Delta X_{fcn}(t) = A_{fcn}^c \cos(\omega_f t_i) - A_{fcn}^s \sin(\omega_f t_i), & t_s < t_i < t_e \\ \Delta Y_{fcn}(t) = A_{fcn}^s \cos(\omega_f t_i) + A_{fcn}^c \sin(\omega_f t_i), & t_s < t_i < t_e \end{cases}$$

где $\omega_f = -\frac{2\pi \text{ rad}}{430 \text{ day}}$ — угловая частота FCN, t_s и t_e — начало и конец для данного окна в юлианских датах.

Предполагается, что физическое обоснование изменения параметров FCN может быть связано с возникновением геомагнитной активности (Zhu et al., 2021). Природа колебаний FCN с точки зрения резонанса в твердотельных приливах Земли была рассмотрена в статье Губанова В. С. и Курдубова С. Л. (Gubanov, Kurdubov, 2015).

Нужно отметить, что с практической точки зрения все построенные ранее модели свободной нутации, основывающиеся на переменной фазе и амплитуде, имеют границы применимости: при использовании их за пределами интервала, на котором они были построены, ошибка прогноза стремительно возрастает. Это является существенным недостатком, например, при обработке наблюдений в режиме службы ПВЗ. Нами предпринята попытка построения новой модели, лишенной этого недостатка.

Данные координат небесного полюса для построения моделей FCN

В работе (Malkin, 2016) данные были взяты из нескольких источников: комбинированный ряд IVS, ряд C04 Парижской обсерватории, получае-

мый путем сглаживания комбинированного ряда IVS, и ряд военно-морской обсерватории США (USNO). Из анализа данных из различных источников был сделан вывод, что данные IVS предпочтительнее для исследования явления FCN и уточнения модели прецессии и нутации. Автором были рассмотрены 6 моделей FCN. Эти модели сравнивались между собой, а также с комбинированными рядами CPO по следующим критериям: стохастические и систематические различия, вариации амплитуды и фазы FCN. При сравнении моделей FCN, полученных из рядов C04 и USNO, с рядом CPO IVS отклонения составили около 15 мкс дуги, что существенно меньше различий между самими рядами CPO, предоставляемыми разными центрами обработки. Также было показано, что получаемые модели FCN существенным образом зависят от используемого ряда CPO.

Ряд, который мы анализировали в дальнейшей работе, был получен с помощью программного пакета QUASAR (Губанов и др., 2007), который позволяет провести глобальное уравнивание всех доступных РСДБ-наблюдений. В процессе глобального уравнивания ряд ПВЗ вычисляется совместно с уточнением каталогов координат источников и станций, принятых Международной службой вращения Земли и систем отсчета. Полученный ряд ПВЗ далее именуется как «ряд QUASAR».

Спектральный анализ координат небесного полюса

На первом этапе был проведен анализ спектра двух рядов поправок к координатам небесного полюса: ряда finals, предоставляемого Международной службой вращения Земли и систем отсчета, и ряда QUASAR в окрестности частоты, соответствующей периоду 430 дней. Перед построением спектрограмм удалялся полиномиальный тренд 5 порядка, который включает долговременные изменения, вызванные небольшими поправками на прецессию, смещением системы отсчета и неточностью 18.6-летней нутации. (Lambert, 2009).

Для удобства анализа мы представили поправки к координатам небесного полюса как комплексное число $(\Delta X + i\Delta Y)$. Это допустимо, так как изменение поправок к координатам небесного полюса описывается двумя ортогональными переменными на плоскости сферы, а значит положение небесного полюса в данный момент времени можно представить в виде комплексного числа с вещественной частью ΔX и мнимой частью ΔY . Соответственно, при спектральном анализе такого комплексного временного ряда получаемые отрицательные значения частот (периодов) будут описывать ретроградное вращение, а положительные — проградное.

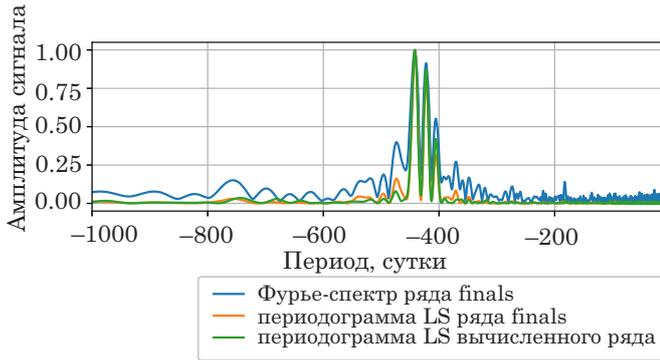


Рис. 1. Фурье-спектр и периодограмма Ломба-Скаргла равномерного ряда *finals*; периодограмма Ломба-Скаргла неравномерного вычисленного ряда

Мы имеем дело как с равноотстоящим временным рядом (ряд *finals*), так и с неравноотстоящим рядом QUASAR, полученным непосредственно из обработки РСДБ-наблюдений, которые проводятся не каждый день. Для анализа неравноотстоящего ряда мы использовали периодограмму Ломба-Скаргла (LS) ([Lomb, 1976](#); [Scargle, 1983](#)).

Далее было проведено сравнение классического Фурье-спектра и LS-спектра для равноотстоящего ряда координат небесного полюса *finals*. Для увеличения частотного разрешения периодограммы применялась Фурье-интерполяция. Сравнение полученных спектров приведено на рис. 1. Можно заметить, что основные гармоники в Фурье-спектре и LS-спектре ряда *finals* в значительной степени совпадают.

Построение гармонической модели FNC

Модели FCN, опубликованные в работах различных авторов, например ([Lambert, 2009](#); [Mal'kin, 2016](#); [Zhu et al., 2021](#)), основаны на одной частоте с переменной амплитудой. Однако анализ спектра рядов координат небесного полюса на рис. 1 показывает, что наблюдаемая переменность может быть также описана моделью с несколькими гармониками с постоянными амплитудами, которые в результате биения вызывают изменение амплитуды суммарного сигнала.

На втором этапе с помощью метода CLEAN ([Roberts et al., 1987](#)) был проведен гармонический анализ рядов *finals* и QUASAR. В первую очередь по спектру определялась гармоника с максимальной амплитудой и с помощью линейного МНК вычислялось значение ее амплитуды. После чего данная гармоника исключалась из первоначального ряда, строился спектр полученного ряда и заново повторялась процедура с определением следующей по величине амплитуды гармоники. Сумма исключенных гармоник является основой построенной модели. Далее такая модель будет называться «Модель 1».

Так как частоты определяемых гармоник достаточно близки в первоначальном спектре и накладываются друг на друга, более корректная модель может быть построена путем уточнения каждой компоненты модели с помощью нелинейного МНК. Полученные при построении Модели 1 параметры гармоник, а именно частоты и амплитуды, использовались в качестве начальных параметров, для их последующего уточнения с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта ([Levenberg, 1944](#); [Marquardt, 1963](#)). Таким образом была получена «Модель 2».

Сравнение моделей

Для исследования построенного алгоритма и полученных с его помощью моделей производилось их сравнение с моделью, описанной в ([Lambert, 2009](#)). С использованием модели Ламберта создан сайт [Free core nutation from IERS data](#), который регулярно обновляется с появлением новых данных об углах нутации. Для сравнения была взята последняя модель с сайта, построенная по данным до конца 2023 г. Результаты сравнения моделей (по горизонтали) с рядами координат полюса (по вертикали) приведены в табл. 1. Можно отметить, что СКО различных моделей по сравнению с рядами *finals* и QUASAR различаются незначительно. В случае сравнения с рядом QUASAR модель Ламберта имеет немного меньшие СКО по обеим координатам при гораздо большем числе параметров (6 параметров в предлагаемой модели, 162 параметра в модели Ламберта). Но в случае сравнения с рядом *finals* «Модель 1», построенная с использованием ряда QUASAR, по координате Y имеет немного меньшие значения СКО, чем модель Ламберта.

На рис. 2 показано сравнение спектров ряда *finals* построенной модели и модели Ламберта вблизи номинальной частоты FCN. Как видно из этого рисунка, двух гармоник оказывается достаточно для построения модели, спектр которой близок к спектру ряда *finals*. На рис. 3 и 4 представлены графики координат небесных полюсов рассматриваемых моделей FCN.

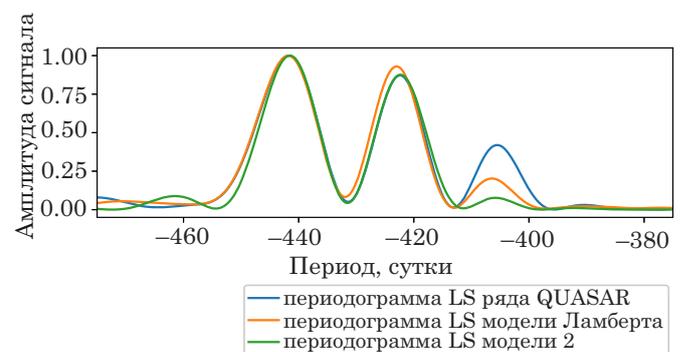


Рис. 2. Периодограммы Ломба-Скаргла ряда QUASAR и различных моделей

Таблица 1

Значения СКО разных моделей относительно рядов QUASAR и finals

Модель	Ряд QUASAR		Ряд finals	
	ΔX , mas	ΔY , mas	ΔX , mas	ΔY , mas
Модели построены с использованием ряда QUASAR				
Модель 1	224	227	187	161
Модель 2	223	227	187	161
Модели построены с использованием ряда finals				
Модель 1	226	228	151	169
Модель 2	226	228	150	169
Модель Ламберта				
	219	224	144	162

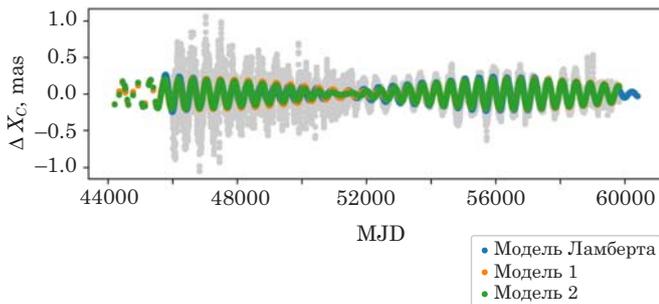


Рис. 3. Различные модели FCN на фоне ряда координат небесного полюса finals (координата X)

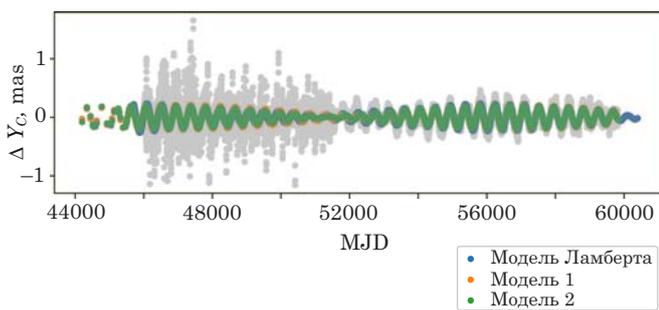


Рис. 4. Различные модели FCN на фоне ряда координат небесного полюса finals (координата Y)

В табл. 2 приведены значения периодов рассматриваемых моделей FCN. В целом видно, что существенных различий между предлагаемыми Моделями 1 и 2 нет, кроме участка в районе даты 51000 MJD, на котором амплитуда Модели 2 становится меньше по сравнению с другими моделями.

Таблица 2

Значения периодов различных моделей FCN, дни

Модель Ламберта	Модель 1	Модель 2
-430.21	-422.7 и -441.7	-422.87 и -441.04

Заключение

В результате исследования была разработана двухкомпонентная гармоническая модель свободной нутации ядра Земли, содержащая всего 6 свободных параметров. Эти параметры могут быть определены по координатам небесного полюса, представленным в сводном ряде finals или вычисленным непосредственно из обработки РСДБ-наблюдений с использованием программного обеспечения QUASAR.

Построенная модель обеспечивает хорошее согласие с наблюдениями: расхождения при сравнении с наблюдениями находятся на том же уровне, что и для многопараметрических моделей с переменными амплитудой и фазой. Тот факт, что остаточное движение небесного полюса может быть хорошо описано с помощью простой двухчастотной модели, может быть свидетельством в пользу двухкомпонентной модели земного ядра, предложенной, например, в работе (Krasinsky, 2006).

Полученная модель может быть использована для улучшения предсказания координат небесного полюса, а также при обработке РСДБ-наблюдений.

Литература

- Губанов В. С., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф. Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 61–83.
- Free core nutation from IERS data [Электронный ресурс]. URL: <http://ivsopar.obspm.fr/fcn/> (дата обращения: 25.04.2024).
- Gattano C., Lambert S., Bizouard C. Comparison of official IVS nutation time series from VLBI analysis / SF2A-2015: Proceedings of the annual meeting of the french society of astronomy and astrophysics. 2015. P. 115–119.
- Gubanov V. S., Kurdubov S. L. Resonances in solid Earth tides from VLBI observations // Astronomy Letters. 2015. Vol. 41, no. 5. P. 232–237.
- Karbon M., Lambert S., Bizouard C., Richard J. Y. Impact of the parameterization of the source positions on the Free Core Nutation / Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA Era / ed. by Bizouard C. 2020. P. 79–84.
- Krasinsky G. A. Numerical theory of rotation of the deformable Earth with the two-layer fluid core. Part 1: Mathematical model. Celestial Mech Dyn Astr 96. 2006. P. 169–217.
- Roberts D. H., Lehar J., Dreher J. W. Time series analysis with CLEAN. I. Derivation of a spectrum // The Astronomical Journal. 1987. Vol. 93. P. 968–989.
- Lambert S. Empirical model of the free core nutation (technical note). 2009.
- Levenberg K. A Method for the solution of certain nonlinear problems in least squares // Quarterly of Applied Mathematics. 1944. Vol. 2. P. 164–168.
- Lomb N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophys. Sp. Sci. 1976. Vol. 39. P. 447–462.
- Malkin Z. Joint analysis of celestial pole offset and free core nutation series // Journal of Geodesy. 2017. Vol. 91. P. 839–848.
- Marquardt D. An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // SIAM Journal on Applied Mathematics. Vol. 11. 1963. P. 431–441.
- Mathews P. M., Herring T. A., Buett B. Modeling of nutation and precession: new nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107, no. B4. doi: 10.1029/2001JB000390.
- Nurul Huda I., Bizouard C., Lambert S., Ziegler Y. Estimation of Earth rotation resonance parameters through VLBI analysis / Astrometry, Earth Rotation, and Reference Systems in the GAIA Era / ed. by Bizouard C. 2020. P. 123–127.
- Rosat S., Lambert S. B., Gattano C., Calvo M. Earth's core and inner-core resonances from analysis of VLBI nutation and superconducting gravimeter data // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 208, no. 1. P. 211–220.
- Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. 2. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Ap. J. 1983. Vol. 263. P. 835–853.
- Triana S., Requier J., Trinh A., Dehant V., Zhu P. Ohmic and viscous damping of the Earth's Free Core Nutation / EGU general assembly conference abstracts. 2021. P. EGU21–12492.
- Zhu P., Triana S., Requier J., Trinh A., Dehant V. Quantification of corrections for the main lunisolar nutation components and analysis of the free core nutation from vlbi-observed nutation residuals // Journal of Geodesy. 2021. Vol. 95. P. 57.