

УДК 551.242

О СВЯЗИ ЧАСТОТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ ${}_0S_2$ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

© 2023 г. А. А. Спивак^{1,*}, Д. Н. Локтев^{1,**}, А. В. Тихонова^{1,***}, В. А. Харламов^{1,****}

Представлено академиком В.В. Адушкиным 28.10.2022 г.

Поступило 28.10.2022 г.

После доработки 02.11.2022 г.

Принято к публикации 02.11.2022 г.

На основе результатов инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями в обсерватории Михнево ИДГ РАН и данных каталога IERS установлено, что выделяемая в спектрах вариаций магнитного поля частота F основной сфероидальной моды собственных колебаний Земли ${}_0S_2$ изменяется со временем, причем значения F выше в периоды уменьшения скорости вращения Земли и ниже при ее увеличении. Получена эмпирическая зависимость между вариациями F и скоростью вращения Земли.

Ключевые слова: Земля, собственные колебания, скорость вращения, магнитное поле, вариации

DOI: 10.31857/S2686739722602472, **EDN:** SWWHWA

Изучение собственных колебаний Земли (СКЗ) представляет значительный интерес с точки зрения разработки реальных моделей планеты, характеристики внутренних геосфер, анизотропии и динамики их изменений, а также описания диссипативных процессов, протекающих в земных недрах, в частности, при дифференциальных смещениях внутреннего ядра относительно мантии [1, 2]. При этом важно устанавливать значение частот основных мод СКЗ и их вариаций.

Наиболее ярко СКЗ проявляются при их возбуждении в результате кратковременных сильных воздействий на планету в виде сильных землетрясений с магнитудой более 6.5, вулканических эксплозий, мощных взрывов и т.д. [3]. Традиционно частоты СКЗ выделяются на основе спектрального анализа сейсмических записей, полученных в период сильных землетрясений [4, 5]. Вместе с тем весьма информативными представляются подходы, основанные на анализе вариаций геофизических полей, в частности, геомагнитного поля [6, 7].

Среди большого количества сфероидальных ${}_nS_m$ и тороидальных ${}_nT_m$ мод СКЗ в качестве одной

из основных рассматривается фундаментальная мода ${}_0S_2$, теоретическое значение¹ частоты которой F_0 составляет ~ 0.3095 мГц, что соответствует периоду колебаний ~ 53.9 мин [9, 10]. Замечено, что значение частоты F моды ${}_0S_2$, установленное на основе анализа сейсмических или магнитных записей, отличается от F_0 и, более того, определенная таким образом частота F принимает различные значения для разных периодов времени [4, 6]. Можно предполагать, что одной из возможных причин вариации частоты F является влияние скорости вращения Земли на общую динамику планеты.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что скорость вращения Земли или, как следствие, длительность земных суток T_0 не постоянны и характеризуются периодическими и непериодическими вариациями [11, 12]. При этом в качестве меры изменения длительности суток традиционно используется величина t^* , равная отклонению T_0 от длительности эфемеридных (“стандартных”) суток $T^* = 86\,400$ с [11].

Инструментально установлено, что неравномерность вращения Земли проявляется в характере деформационных процессов, протекающих в литосфере [13, 14], глобальном сейсмическом процессе [15–19], сейсмическом шуме [20], вулканической активности [21] и т.д. Было также показано, что изменение угловой скорости враще-

¹Институт динамики геосфер
им. академика М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: aaspivak100@gmail.com

**E-mail: dloktev@gmail.com

***E-mail: tikhonova@idg.ras.ru

****E-mail: vladimkharlamov@yandex.ru

¹ Определяется вычислением с использованием идеально упругой изотропной модели Земли сферически симметричной формы без учета ее вращения [8].

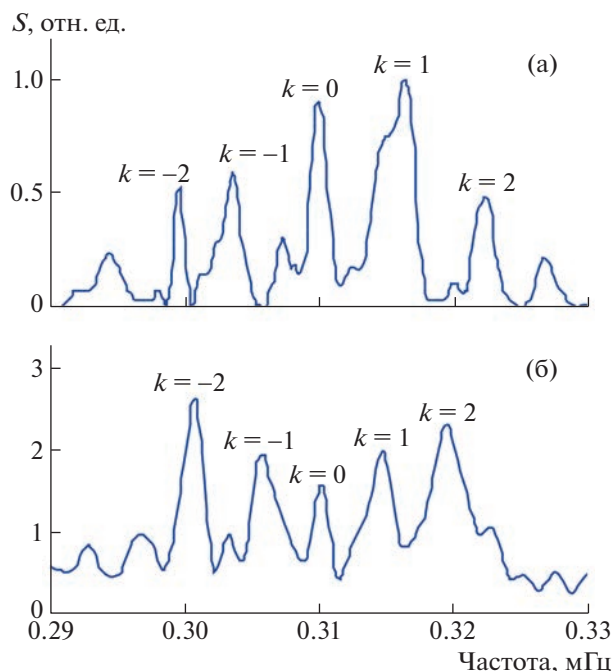


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности геомагнитных вариаций от частоты для событий 10.01.2018 г. (а) и 21.01.2021 г. (б).

ния Земли приводит к уменьшению либо увеличению степени сжатия земного вещества и, таким образом, к изменению межплитных промежутков, вследствие чего и наблюдается изменение сейсмической активности планеты [22].

В настоящем сообщении рассматривается связь между частотой основной сфероидальной вырожденной моды ${}_0S_2$ и изменением скорости вращения Земли. Частота F_0 моды ${}_0S_2$ определялась на основе спектрального анализа геомагнитных вариаций, зарегистрированных в обсерватории Михнево ИДГ РАН (ГЕО: 54.959°с.ш.; 37.766°в.д.) [6, 7]. Для анализа использовались временные ряды цифровых данных с дискретностью 1 мин, полученные при регистрации вертикальной, наиболее чувствительной к СКЗ компоненты магнитного поля Земли. Значения t^* , характеризующие вариации скорости вращения Земли, выбирались из общедоступного каталога IERS (The International Earth Rotation and Reference Systems Service²) с дискретностью 1 сут. Для анализа выбирались временные периоды длительностью 5–10 сут, следующих за сильными землетрясениями с магнитудой в интервале 7–9. При этом рассматривалась выборка сейсмических событий за период с 2015 г. до сентября 2022 г. из каталога USGS (табл. 1). Выбор событий определялся отсутствием в анализируемый период времени других сильных землетрясений, а также

глобальных и локальных возмущений магнитного поля, камуфлирующих относительно слабые проявления расщепления мультиплета ${}_0S_2$.

С целью повышения точности определения частоты F выбранные участки магнитных данных фильтровались полосовым фильтром Баттерворта 7-го порядка в интервале частот 0.29–0.33 МГц. Затем на основе спектрального анализа полученных цифровых рядов по методу Ломба–Скаргла [23–25] определялась тонкая структура мультиплета ${}_0S_2$ с выделением синглетов ${}_0S_2^k$, где k – азимутальный номер, принимающий в данном случае значения 0, ± 1 и ± 2 . Центральный спектральный пик, соответствующий $k = 0$, выбирался в качестве значения F . Математическая обработка данных выполнялась с использованием пакета программ MatLab.

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты спектрального анализа геомагнитных вариаций в выбранном диапазоне периодов для некоторых событий.

На приведенных на рис. 1 спектрах отчетливо видны все пять синглетов моды ${}_0S_2$, что позволяет определить значения F , которые составили в данном случае 0.3099 (10.01.2018 г.) и 0.3102 (21.01.2021 г.). Результаты оценок значений F для всех рассмотренных в данной работе событий приведены в табл. 1. В этой же таблице приведены значения t^* из каталога IERS, которые для рассмотренных в качестве примера случаев составили +0.507 мс (10.01.2018 г.) и –0.235 мс (21.01.2021 г.). Анализ полученных данных показывает, что для событий, произошедших в периоды времени, характеризующиеся отрицательными значениями t^* (угловая скорость вращения Земли больше стандартной), частота мультиплета ${}_0S_2$ ниже, и наоборот, увеличенным значениям t^* соответствуют повышенные значения F .

Обобщающий график зависимости $F(t^*)$ приведен на рис. 2. Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о наличии хорошо выраженной тенденции к увеличению частоты мультиплета ${}_0S_2$ с увеличением t^* , т.е. с уменьшением угловой скорости вращения Земли. Для выполнения оценочных расчетов полученную зависимость $F(t^*)$ можно принять в виде соотношения:

$$F \approx 0.308 + 0.0016t^*. \quad (1)$$

Вычисленный коэффициент ранговой корреляции Спирмена $d \approx 0.8$, что свидетельствует о высокой тесноте связи между F и t^* .

Таким образом, на примере 37 событий впервые показано, что изменение угловой скорости вращения Земли вызывает изменение частоты F основной фундаментальной моды СКЗ ${}_0S_2$. При этом предложена эмпирическая связь между F и

² <https://www.iers.org/>

Таблица 1. Перечень сейсмических событий

№ п/п	Дата	Время	Магнитуда	ГЕО		t^* , мс	F , мГц
				Широта	Долгота		
1	25.04.15	06:11	7.8	28.231°с.ш.	84.731°в.д.	1.112	0.3094
2	07.05.15	07:10	7.1	07.218°ю.ш.	154.557°в.д.	1.032	0.3113
3	17.06.15	12:51	7.0	35.364°ю.ш.	17.16°з.д.	0.197	0.3932
4	10.07.15	04:12	6.7	9.307° ю.ш.	158.403°в.д.	1.178	0.3094
5	18.07.15	02:27	7.0	10.401°с.ш.	165.141°з.д.	0.483	0.30903
6	16.09.15	23:18	7.0	31.562°ю.ш.	71.426°з.д.	1.256	0.3086
7	20.10.15	21:52	7.1	14.860°ю.ш.	167.303°в.д.	1.548	0.3105
8	26.10.15	09:09	7.5	36.524°с.ш.	70.368°в.д.	2.234	0.3118
9	24.11.15	22:45	7.6	10.537°ю.ш.	70.944°з.д.	1.753	0.3117
10	07.12.15	07:50	7.2	38.211°с.ш.	72.780°в.д.	1.681	0.3111
11	30.01.16	03:25	7.2	53.978°с.ш.	158.546°в.д.	1.452	0.3098
12	02.03.16	12:49	7.8	4.952°ю.ш.	94.330°в.д.	1.672	0.3099
13	16.04.16	23:58	7.8	0.382°с.ш.	79.922°з.д.	1.622	0.3125
14	28.05.16	09:46	7.2	56.241°ю.ш.	26.935°з.д.	1.533	0.3100
15	08.12.16	17:38	7.8	10.681°ю.ш.	161.327°в.д.	1.674	0.3110
16	17.12.16	10:51	7.9	4.505°ю.ш.	153.522°в.д.	1.278	0.3090
17	17.07.17	23:34	7.7	54.443°с.ш.	168.857°в.д.	0.581	0.3093
18	08.09.17	04:49	8.2	15.022°с.ш.	93.899°з.д.	0.904	0.3089
19	19.09.17	18:14	7.1	18.550°с.ш.	98.489°з.д.	1.099	0.3108
20	10.01.18	02:51	7.5	17.483°с.ш.	83.520°з.д.	0.507	0.3099
21	19.08.18	00:19	8.2	18.113°ю.ш.	178.153°з.д.	−0.022	0.3072
22	24.08.18	09:04	7.1	11.036°ю.ш.	70.828°з.д.	−0.178	0.3060
23	06.09.18	15:49	7.9	18.474°ю.ш.	179.350°в.д.	0.1653	0.3088
24	28.09.18	10:02	7.5	0.256°ю.ш.	119.846°в.д.	0.920	0.3102
25	22.02.19	10:17	7.5	2.186°ю.ш.	77.051°з.д.	1.570	0.3120
26	24.06.19	02:53	7.3	6.408°ю.ш.	129.169°в.д.	0.0263	0.3079
27	14.07.19	09:10	7.2	0.586°ю.ш.	128.034°в.д.	−0.769	0.3082
28	23.06.20	15:29	7.4	15.886°с.ш.	96.008°з.д.	−1.161	0.3055
29	17.07.20	02:50	7.0	7.836°ю.ш.	147.770°в.д.	−1.316	0.3048
30	22.07.20	06:12	7.8	55.072°с.ш.	158.596°з.д.	−1.064	0.3060
31	21.01.21	12:23	7.0	4.993°с.ш.	127.515°в.д.	−0.235	0.3102
32	03.02.21	05:23	6.7	36.280°ю.ш.	97.800°з.д.	0.644	0.3096
33	04.03.21	19:28	8.1	29.723°ю.ш.	177.278°з.д.	0.434	0.3081
34	22.08.21	21:33	7.1	60.285°ю.ш.	24.874°з.д.	−0.846	0.3044
35	08.09.21	01:47	7.0	16.947°с.ш.	16.947°	−0.049	0.3085
36	26.05.22	12:02	7.2	14.908°ю.ш.	70.292°з.д.	0.207	0.3075
37	08.06.22	00:55	6.5	9.047°ю.ш.	71.178°з.д.	−0.381	0.3079

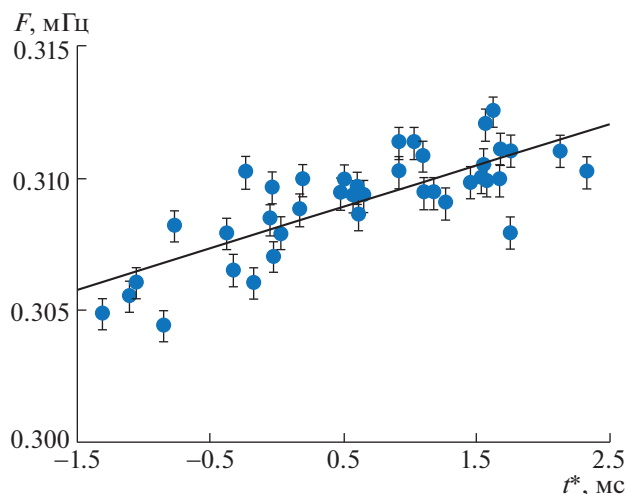


Рис. 2. Зависимость частоты мультиплета ${}_0S_2$ от t^* .

вариаций отклонения длительности суток от эфемеридного значения.

Традиционно при рассмотрении СКЗ фактор, связанный с вращением Земли, учитывается при оценках частоты синглетов. В частности, для моды ${}_0S_2$ [9]:

$${}_0\omega_2^k / {}_0\omega_2 = 1 + {}_0\alpha_2 + k {}_0\beta_2 + k^2 {}_0\gamma_2, \quad (2)$$

где ${}_0\omega_2^k$ и ${}_0\omega_2$ — соответственно циклическая частота собственной моды ${}_0S_2^k$ и вырожденное значение частоты моды ${}_0S_2$, которое в данном случае рассматривается как фиксированная величина, ${}_0\alpha_2$, ${}_0\beta_2$ и ${}_0\gamma_2$ — параметры расщепления, причем параметр ${}_0\beta_2$ определяется вращением Земли, а параметры ${}_0\alpha_2$ и ${}_0\gamma_2$ — вращением Земли и ее эллиптичностью. Однако, как показывают приведенные выше данные и данные [4, 9, 10], нельзя исключать, что частота ${}_0\omega_2$ также является функцией скорости вращения Земли.

Следует отметить, что в настоящей работе СКЗ выделяется на основе анализа вариаций магнитного поля Земли и представлено упрощенное представление о влиянии скорости вращения Земли на СКЗ, поскольку скорость вращения Земли (в данном случае в виде характеризующего ее параметра t^*) используется в качестве обобщающей величины. В действительности же процесс вращения Земли достаточно сложен и характеризуется не только скоростью вращения, но также прецессией и нутацией оси вращения и, как упоминалось выше, динамикой протекающих в недрах Земли деформационных процессов. Все это естественным образом оказывает влияние на дифференциальные связи между внутренними геосферами, в частности, между жидким и твердым ядром Земли и жидким ядром и мантией, и,

следовательно, на геодинамо как основной источник главного магнитного поля Земли. Авторы не исключают того, что при более тонком анализе геомагнитных вариаций удастся установить влияние перечисленных выше факторов как на геомагнитные вариации, так и на СКЗ по отдельности. Однако это предмет дальнейших исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 122032900185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарков В.Н. Физика Земных недр. М.: Наука и образование, 2012. 384 с.
2. Fukao Y., Nishida N., Suda N., Nawa R., Kobayashi N. A theory of the Earth's background free oscillations // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № B9. 2206. <https://doi.org/10.1029/2001JB000153>
3. Соболев Г.А. О некоторых свойствах возникновения и эволюции колебаний Земли после землетрясений // Физика Земли. 2013. № 5. С. 12–27.
4. Милуков В.К., Виноградов М.П., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А. Собственные колебания Земли, возбужденные тремя крупнейшими землетрясениями последнего десятилетия, по деформационным наблюдениям // Физика Земли. 2015. № 2. С. 21–36.
5. Соболев Г.А. Пульсации собственных колебаний Земли // Физика Земли. 2015. № 3. С. 3–12.
6. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Проявление лунно-солнечного прилива и собственных колебаний Земли в вариациях магнитного поля // Физика Земли. 2018. № 6. С. 59–71.
7. Спивак А.А. Проявление синглетов основной сфероидальной моды Земли ${}_0S_2$ в геомагнитных вариациях // ДАН. 2018. Т. 481. № 5. С. 481–595.
8. Gilbert J.F., Backus G.T. Approximate solutions to the inverse normal mode problem // Bull. Seism. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 10–131.
9. Милуков В.К. Наблюдение тонкой структуры основной сфероидальной моды Земли ${}_0S_2$ // Физика Земли. 2005. № 4. С. 16–22.
10. Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е. Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // ДАН. 2018. Т. 481. № 1. С. 315–319.
11. Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Наука. Физматлит, 2002. 384 с.
12. Тиссен В.М., Малкин З.М. Тренды и вариации в неравномерностях вращения Земли // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8. Вып. 1. С. 167–178.
13. Адушкин В.В., Гамбурцева Н.Г., Нестеркина М.А., Санина И.А., Султанов Д.Д., Усольцева О.А. О связи

- вариаций времен пробега сейсмических волн с изменением скорости вращения Земли // *Физика Земли*. 2010. № 3. С. 66–78.
14. Милуков В.К., Кравчук В.К., Миронов А.П., Латынина Л.А. Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли // *Физика Земли*. 2011. № 3. С. 96–109.
 15. Антикаева О.И. Миграция очагов слабых землетрясений Гармского района и вариации скорости вращения Земли // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2013. Т. 40. № 3. С. 54–63.
 16. Левин Б.В., Сасорова Е.В. О связи вариаций скорости вращения Земли и ее сейсмической активности // *ДАН*. 2015. Т. 464. № 3. С. 351–355.
 17. Левин Б.В., Сасорова Е.В. О влиянии скорости вращения Земли на глобальную сейсмичность (по материалам наблюдений с 1720 по 2016 г.) // *Геосистемы переходных зон*. 2017. № 3. С. 3–20.
 18. Трофименко С.В., Быков В.Г., Колодезников И.И. пространственное распределение эпицентров землетрясений северо-восточного сегмента Амурской микроплиты в различных фазах вращения Земли // *Наука и образование*. 2015. № 4. С. 41–44.
 19. Уткин В.И., Юрков А.К., Цурко И.А. Вариации неравномерного вращения Земли как триггирующий фактор сейсмичности планеты // *Геология и геофизика Юга России*. 2012. № 1. С. 3–13.
 20. Любушин А.А., Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К. Связь мультифрактальных и энтропийных свойств сейсмического шума на Камчатке с неравномерностью вращения Земли // *Физика Земли*. 2021. № 2. С. 153–163.
 21. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Гурьянов В.Б., Ярмолюк В.В. Связь глобальной вулканической активности и вариаций скорости вращения Земли // *ДАН*. 2019. Т. 484. № 6. С. 729–733.
 22. Левин Б.В., Сасорова Е.В., Доманский А.В. О гидродинамической неустойчивости в средних широтах Земли, обусловленной вращением планеты // *ДАН*. 2011. Т. 438. № 1. С. 110–113.
 23. Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally data // *Astrophys. & Space Sci.* 1976. V. 39. P. 447–462.
 24. Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835–853.
 25. Schwarzenberg-Czerny A. The distribution of empirical periodograms: Lomb-Scargle and PDM spectra // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1998. V. 301. P. 831–840.

ON THE RELATIONSHIP OF THE FREQUENCY OF THE FUNDAMENTAL ${}_0S_2$ MODE AND THE VELOCITY OF THE EARTH ROTATION

A. A. Spivak^{a,*}, D. N. Loktev^{a,**}, A. V. Tikhonova^{a,***}, and V. V. Kharlamov^{a,****}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^{*}*E-mail: aaspivak100@gmail.com*

^{**}*E-mail: dloktev@gmail.com*

^{***}*E-mail: tikhonova@idg.ras.ru*

^{****}*E-mail: vladimkharlamov@yandex.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin October 28, 2022

Based on the results of instrumental observations of geomagnetic variations at the Mikhnevo observatory of the IDG RAS and data from the IERS catalog, it was found that the frequency F of the main spheroidal mode of the Earth's natural oscillations ${}_0S_2$, distinguished in the spectra of magnetic field variations, changes with time, and the values of F are higher during periods of a decrease in the rotation speed Earth and below with its increase. An empirical relationship between the variations of F and the speed of the Earth's rotation is obtained.

Keywords: Earth, natural vibrations, rotation speed, magnetic field, variations