

УДК 550.344

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ НА ЧАСТОТУ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ ${}_0S_2$

© 2024 г. А. А. Спивак^{1,*}, Д. Н. Локтев¹, А. В. Тихонова¹, В. А. Харламов¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

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

Анализируется частота фундаментальной моды F собственных колебаний Земли ${}_0S_2$, выделенная в спектрах геомагнитных вариаций в Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ИДГ РАН, в период сильных землетрясений. Показано, что величина F принимает разные значения в зависимости от даты события, причем значения F выше в периоды, характеризующиеся уменьшением скорости вращения Земли, и ниже – в периоды ее увеличения. По результатам сопоставительного анализа результатов магнитных измерений и данных каталога открытого доступа IERS получена эмпирическая зависимость между вариациями F и скоростью вращения Земли.

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

Для цитирования: Спивак А.А., Локтев Д.Н., Тихонова А.В., Харламов В.А. Влияние скорости вращения Земли на частоту фундаментальной моды ${}_0S_2$ // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 15–24. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_15

Введение

Собственные колебания Земли (СКЗ) являются весьма важной характеристикой планеты. К настоящему времени выделено более тысячи мод СКЗ сфероидального ${}_nS_k$ и тороидального ${}_nT_k$ типа, а также их синглетов ${}_nS_k^m$ и ${}_nT_k^m$. Анализ параметров вырожденных колебаний и их обертонов позволяет не только уточнять строение и в известной мере оценивать состав вещества разных глубинных областей Земли, например, верхней и нижней мантии, ядра и т.д., но также выявлять в них горизонтальные неоднородности и определять их диссипативные свойства [Линьков, 1987; Жарков, 2012; Alterman et al., 1959; Derr, 1969]. Отдельно следует отметить предоставляемые СКЗ возможности для определения динамики внутреннего ядра Земли [Джекобс, 1979]. Все это обуславливает значительный интерес к изучению СКЗ и факторов, определяющих их характеристики.

При хорошей проработке теоретического описания СКЗ с использованием идеально упругой изотропной модели Земли сферически симметричной формы и без учета ее вращения [Стоунли, 1964; Lamb, 1982; Suda et al., 1998] до настоящего времени ощущается явная нехватка наблюдательного материала, уточняющего результаты теоретических исследований и формирующего базы экспериментальных данных для верификации новых моделей Земли.

Следует отметить, что частоты СКЗ определяются рядом факторов, среди которых выделяют гравитационную составляющую, изменяющуюся со временем эллиптичность Земли, скорость ее вращения, изменение дифференциальных движений во внутренних геосферах, мощные процессы, происходящие в атмосфере и т.д. [Линьков, 1987; Tanimoto, 2001; Швед и др., 2018]. Влияние указанных факторов на форму и динамику Земли в целом приводит к тому, что частоты СКЗ, определяемые в результате инструментальных наблюдений F , отличаются от их теоретических значений F_0 . Разности между наблюдаемыми частотами СКЗ и их теоретическими значениями, а также их изменения со временем и служат основой для совершенствования представлений о структуре и динамике Земли, как сложно построенной механической системы [Линьков, 1987; Жарков, 2012].

До настоящего времени в качестве наиболее важных параметров, уточняющих характеристики СКЗ, рассматриваются эллипсоидальность Земли (отличие ее формы от шарообразной) и скорость ее

вращения. Эти факторы учитываются при рассмотрении частот синглетов мультиплетов ${}_nS_k^m$ и ${}_nT_k^m$ в виде [Буллен, 1984; Миллюков, 2005]

$$\frac{{}_n\omega_k^m}{{}_n\omega_k} = 1 + {}_n\alpha_k + m{}_n\beta_k + m^2{}_n\gamma_k, \quad (1)$$

где ${}_n\omega_k^m$ и ${}_n\omega_k$ – соответственно циклическая частота соответствующей моды и вырожденное значение ее собственной частоты, ${}_n\alpha_k$, β_k и γ_k – параметры расщепления, причем параметр β_k определяется вращением Земли, а параметры ${}_n\alpha_k$ и γ_k – вращением Земли и ее эллиптичностью.

При рассмотрении наиболее важных с практической точки зрения длиннопериодных СКЗ большее влияние на частоты ${}_n\omega_k^m$ оказывает фактор, связанный с вращением Земли [Dahlen, Sailor, 1979]. Однако здесь следует учитывать, что скорость вращения Земли не постоянна, а изменяется со временем [Сидоренков, 2002]. В связи с этим представляет интерес рассмотрение вопроса о возможном влиянии на СКЗ скорости вращения Земли.

В настоящей работе в качестве примера рассматривается связь частоты основной сфероидальной моды собственных колебаний Земли ${}_0S_2$ и вариаций скорости вращения Земли.

Исходные данные

В качестве исходных использовались результаты инструментальных наблюдений за магнитным полем Земли, выполненных в ГФО «Михнево» ИДГ РАН (МНВ)¹. Измерения компонент² индукции магнитного поля B_x , B_y и B_z выполнялись с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне ± 68000 нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с⁻¹). Для анализа использовались временные ряды цифровых данных с дискретностью 1 мин, полученные при регистрации вертикальной, наиболее чувствительной к СКЗ, компоненты магнитного поля Земли. Для анализа использовались ряды цифровых записей магнитного поля, выполненных на земной поверхности, сформированные с дискретностью 1 мин.

Частота F моды ${}_0S_2$ определялась на основе спектрального анализа геомагнитных вариаций [Winch et al., 1963], зарегистрированных в периоды сильных землетрясений с магнитудой в интервале 7–9 из каталога USGS. Анализировались данные, полученные в течение первых 5–10 суток после сейсмических событий, произошедших с 2015 г. по сентябрь 2022 г. (табл. 1) при условии отсутствия глобальных и локальных возмущений магнитного поля Земли. Частоты F выделялись в спектре вариаций магнитного поля в полосе частот, содержащей частоту F_0 . Предварительно выбранные участки цифровых магнитных данных фильтровались полосовым фильтром Баттерворта 7-го порядка в интервале частот мультиплета ${}_0S_2$ (0.29–0.33 мГц) [Dahlen, 1968; Gilbert, Backus, 1968]. Далее определялась тонкая структура мультиплета с выделением синглетов ${}_0S_2^m$, где m – азимутальный номер, принимающий в данном случае значения 0, ± 1 и ± 2 . На этом этапе применялся хорошо зарекомендовавший себя метод адаптивной режекторной фильтрации по методике [Уидроу и др., 1975; Сергиенко, 2003]. Алгоритм вычислений позволял одновременно суммировать несколько сигналов с разными значениями частоты.

Преимущество такого подхода заключается в простоте выбора искомым частот, возможности перестройки полосы пропускания и существенном подавлении соседних частот (зависит от длины обрабатываемого ряда) при точном слежении за окрестностью определенной частоты.

Оценка спектра выполнялась на основе метода параметрической авторегрессии [Канасевич, 1985; Марпл, 1990]. В результате указанной процедуры был получен сплошной спектр фильтрованных в полосе 0.29–0.33 мГц сигналов, на котором синглеты выделяются не четко и спектр выделенных синглетов – результат адаптивной режекторной фильтрации. Центральный спектральный пик

¹ Координаты магнитометрического павильона: 54.95° N; 37.76° E.

² Направление осей координат: x – С-Ю, y – В-З, z – вертикально вниз.

выбирался в качестве значения F . Математическая обработка данных выполнялась с использованием пакета программ MatLab. Данные, характеризующие вариации скорости вращения Земли, выбирались из общедоступного каталога IERS (The International Earth Rotation and Reference Systems Service) с дискретностью 1 сут.

Таблица 1.

Перечень сейсмических событий

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

О связи частоты фундаментальной моды ${}_0S_2$ со скоростью вращения Земли

С целью установления частот СКЗ, как правило, используют подход, основанный на анализе результатов гравиметрических, деформационных и сейсмических наблюдений в периоды сильных землетрясений [Линьков, 1987; Милуков и др., 2015; Соболев, 2015]. Действительно, в этом случае мощное сейсмическое воздействие играет роль триггера механических колебаний планеты, что приводит к увеличению амплитуд СКЗ. Это определяет принципиальную возможность регистрировать их имеющимися средствами. Однако следует отметить, что наиболее предпочтительные гравиметрические наблюдения позволяют регистрировать только сфероидальные колебания, вызывающие изменение формы Земли и не позволяют регистрировать тороидальные колебания, поскольку они не связаны с изменением формы и объема планеты.

Сложности выделения СКЗ на основе анализа сейсмических записей связаны с сильным отличием диапазона периодов СКЗ (от ~ 4.5 мин (мода ${}_9S_3$) до 325 мин (мода ${}_1S_1$ – мода Шлихтера)) и верхней границы рабочего диапазона сейсмометрических каналов, максимальное значение которого ограничено ~ 500 с (маятниковый прибор Х. Гилмана). В качестве другого недостатка метода можно отметить необходимость использования при расчетах достаточно тонких подходов к обработке сейсмической информации, основанных на накоплении данных за длинный период времени (~ 10 – 15 сут), что приводит, в этом случае, к искажению текущих значений частот более поздними сейсмическими событиями. Также необходимо учитывать, что не всякое, даже сильное землетрясение, вызывает колебания в длиннопериодной части спектра.

Ранее было предложено выделять моды СКЗ на основе анализа спектральных характеристик геомагнитных вариаций [Адушкин и др., 2017; 2018]. В этом случае, как показывает опыт, удается выделить частоты СКЗ в широком диапазоне периодов, фактически соответствующем диапазону СКЗ.

Среди большого количества сфероидальных ${}_nS_m$ и тороидальных ${}_nT_m$ мод СКЗ в качестве основной в настоящей работе рассматривается фундаментальная мода ${}_0S_2$, теоретическое значение частоты которой F_0 составляет ~ 0.3095 мГц, что соответствует периоду колебаний ~ 53.9 мин [Милуков и др., 2015].

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что экспериментально установленное значение частоты F моды ${}_0S_2$, во-первых, отличается от F_0 и, во-вторых, F принимает разные значения при использовании данных, полученных в разное время [Милуков, 2005; Милуков и др., 2015]. Можно предполагать, что одной из возможных причин, вызывающих изменение частоты F , является влияние скорости вращения Земли на общую динамику планеты.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты спектрального анализа геомагнитных вариаций, зарегистрированных при некоторых событиях. На спектрах хорошо проявляются все синглеты анализируемой 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 определения частоты моды ${}_0S_2$ для других рассмотренных в настоящей работе событий приведены в табл. 1. Рис. 2, на котором приведены результаты спектрально-временного анализа геомагнитных вариаций для одного из событий (10.01.2018 г.), демонстрирует характер и длительности, возбужденных землетрясением СКЗ.

Неравномерность вращения Земли является важным фактором, определяющим ход многих явлений и процессов, происходящих на Земле [Сидоренков, 2002]. Так, данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, свидетельствуют, например, о том, что усредненная вулканическая активность нашей планеты для событий, по крайней мере, с индексом $VIA \geq 4$ коррелирует с вариациями скорости вращения Земли (СВЗ) [Левин и др., 2019]. Многочисленные исследования показывают, что СВЗ оказывает влияние на глобальную сейсмичность Земли, миграцию и кластеризацию очагов землетрясений [Chao, Gross, 1987; Shanker et al., 2001; Уткин, Цурко, 2010; Аптикаева, 2013; Левин, Сасорова, 2015; 2017; Трофименко и др., 2015]. При этом отмечается, что вариации СВЗ могут являться триггером сейсмических событий [Уткин и др., 2012; Bendick, Bilham, 2017]. Имеются также основания считать, что неравномерность вращения Земли оказывает заметное влияние на деформационные

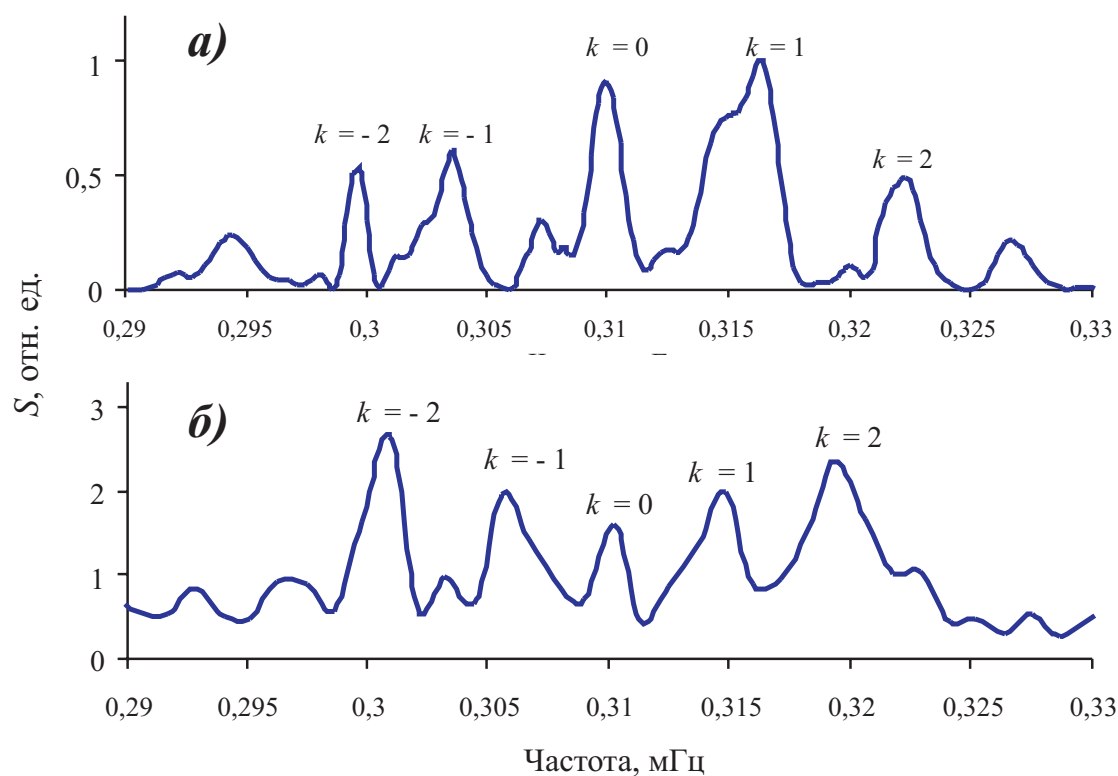


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности геомагнитных вариаций от частоты для событий 10.01.2018 г. (а) и 21.01.2021 г. (б)

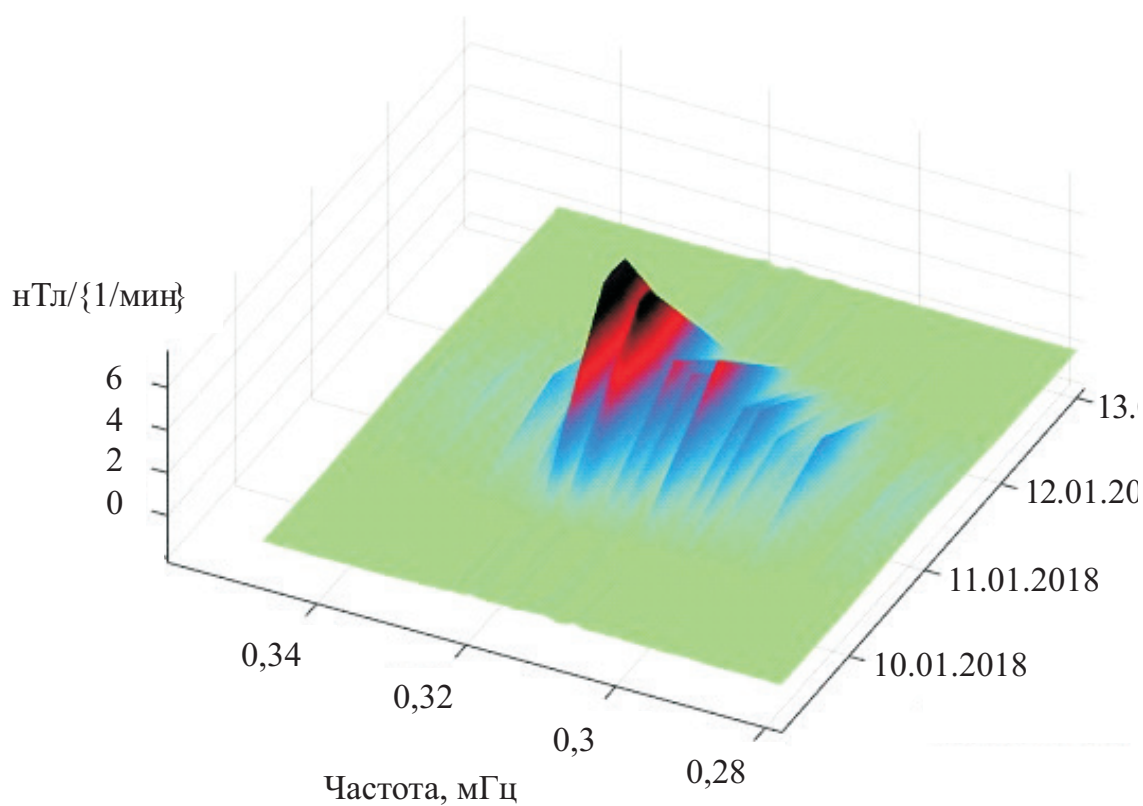


Рис. 2. Результаты спектрально-временного анализа геомагнитных вариаций, вызванных землетрясением 10.01.2018 г. в диапазоне периодов 0.29–0.33 МГц

процессы в литосфере и как результат – на времена пробега сейсмических волн [Адушкин и др., 2010; Милюков и др., 2011]. Более того, весьма правдоподобно, что неравномерность СВЗ изменяет мультифрактальные и энтропийные свойства сейсмического шума [Lyubushin, 2020; Любушин и др., 2021].

СВЗ и, как следствие, длительность земных суток T_0 не постоянны и характеризуются периодическими и непериодическими вариациями [Сидоренков, 2002; Тиссен, Малкин, 2021]. При этом в качестве меры изменения длительности суток традиционно используется величина LOD, равная отклонению T_0 от длительности эфемеридных («стандартных») суток $T^* = 86400$ с [Сидоренков, 2002].

Изменение средней величины LOD зависит от длительности рассматриваемого временного периода и может достигать нескольких миллисекунд в длительности суток и сотен миллисекунд во Всемирном времени на интервалах порядка десятков лет [Тиссен, Малкин, 2021]. Хотя наблюдения за СВЗ выполняются с давних времен (с разным временным шагом: 0.1 года с 1846 по 1890 гг. и 0.5 года, начиная с 1890 г.), наиболее точные данные получены при использовании атомных часов с точностью 10–14 с, начиная с 1956 г. [Proverbio, 2000]. В нашем случае интерес представляет период с 2015 по 2022 гг. (табл. 1). На рис. 3 приведены суточные вариации LOD, полученные с использованием данных IERS, откуда следует, что неравномерность СВЗ достаточно высока. При этом в соответствии с трендом среднее значение LOD за неполные 8 лет уменьшилось примерно в 1.5 раза, что свидетельствует об увеличении в среднем угловой скорости Земли. Значения LOD на даты рассматриваемых землетрясений приведены в табл. 1.

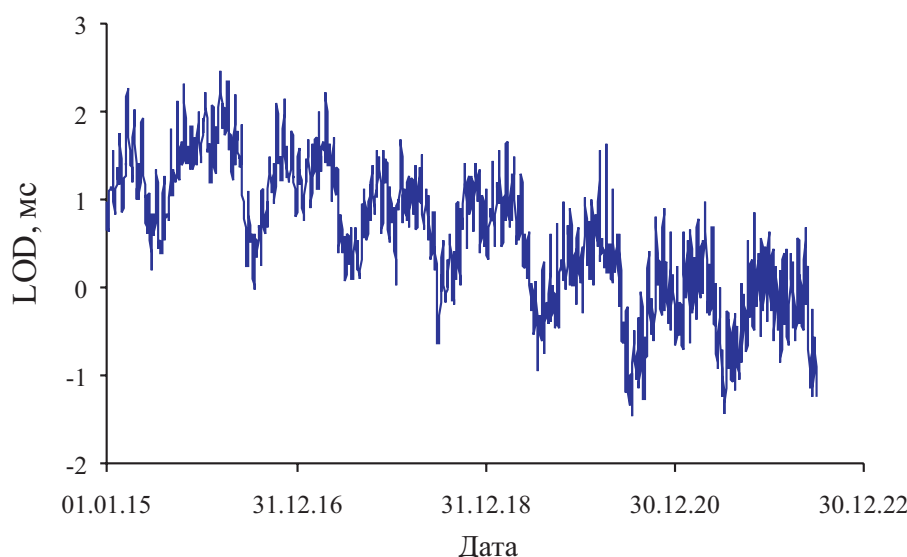


Рис. 3. Суточные вариации LOD за 2015–2022 гг.

Сопоставительный анализ данных из табл. 1 показывает, что для событий, произошедших в периоды времени, характеризующиеся отрицательными значениями LOD (угловая скорость вращения Земли больше стандартной), частота мультиплета ${}_0S_2$ ниже и, наоборот, увеличенным значениям LOD соответствуют повышенные значения F . Полученный график зависимости $F(t^*)$ приведен на рис. 4 и свидетельствует о наличии хорошо выраженной тенденции к увеличению частоты мультиплета ${}_0S_2$ с увеличением LOD, то есть с уменьшением угловой скорости вращения Земли. Для практических оценок полученную зависимость $F(\text{LOD})$ можно аналитически представить в виде:

$$F \approx 0.308 + 0.0016 \text{ LOD, мГц,} \quad (2)$$

где LOD выражена в мс.

Статистические оценки показывают, что коэффициент ранговой корреляции Спирмена, как мера линейной связи между LOD и F , превышает 0.8, что свидетельствует о высокой тесноте связи между этими параметрами.

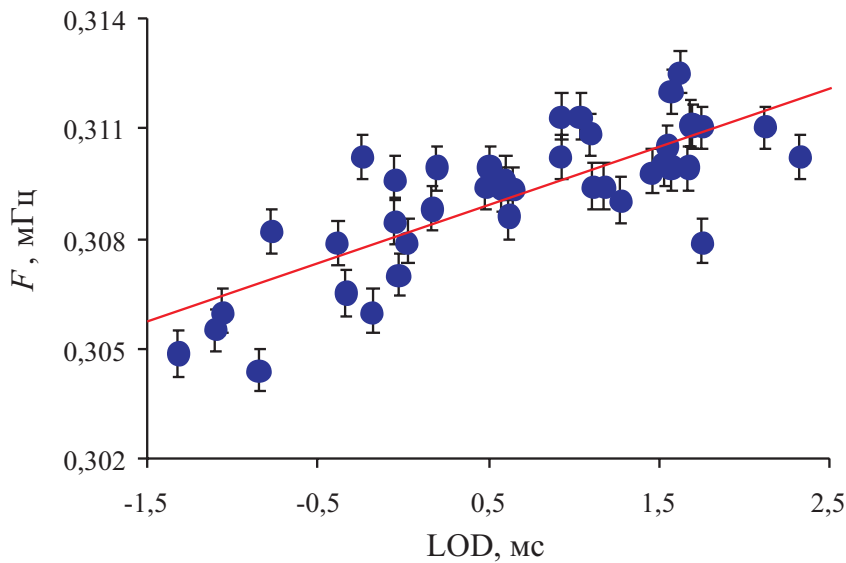


Рис. 4. Зависимость частоты мультиплета ${}_0S_2$ от LOD

Заключение

В результате выполненных исследований на примере 37 событий впервые показано, что вариации частоты F основной фундаментальной моды СКЗ ${}_0S_2$ синхронны к изменению угловой скорости вращения Земли. При этом предложена эмпирическая связь между F и вариацией отклонения длительности суток от эфемеридного значения.

Традиционно при рассмотрении СКЗ фактор, связанный с вращением Земли, учитывается при оценках частоты синглетов в виде соотношения (1). Однако, как показывают приведенные выше данные и данные работ [Geller, Strein, 1977; Fukao et al., 2002; Милуков, 2005], нельзя исключать, что частоты ${}_n\omega_k$, в частности, частота ${}_0\omega_2$ моды ${}_0S_2$ также являются функцией скорости вращения Земли.

Следует отметить, что в настоящей работе представлено упрощенное представление о влиянии скорости вращения Земли на СКЗ. В действительности 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 геодинamo, как основного источника главного магнитного поля Земли, вариации которого в данном случае используются для выделения частоты F . Вполне возможно, что при более детальном анализе спектральных характеристик геомагнитных вариаций удастся установить влияние перечисленных выше факторов как на магнитное поле Земли, так и на СКЗ по отдельности.

Авторы не исключают, что установленная корреляционная зависимость между частотой конкретной моды СКЗ ${}_0S_2$ и скоростью вращения Земли может представляться дискуссионной. Однако нельзя не отметить, что полученные данные вполне согласуются с возможным механизмом прямого или опосредованного влияния скорости вращения Земли на СКЗ, связанного с изменением ее формы и, соответственно, момента инерции.

В любом случае, по мнению авторов, приведенные данные могут способствовать разработке новых подходов к описанию динамики Земли и установлению параметров ее внутренних диссипативных процессов.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (тема № 122032900185-5).

Список литературы

- 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 изменениями скорости вращения Земли // Физика Земли. 2010. № 3. С. 66–78. <https://elibrary.ru/loioyx>
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Новый метод изучения собственных колебаний Земли на основе анализа геомагнитных вариаций // Доклады академии наук. 2017. Т. 476. № 5. С. 452–455. <https://doi.org/10.7868/S0869565217280210>
- Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Проявления лунно-солнечного прилива и собственных колебаний Земли в вариациях магнитного поля // Физика Земли. 2018. № 6. С. 59–71. <https://doi.org/10.1134/S0002333718060017>
- Антикаева О.И. Миграция очагов слабых землетрясений Гармского района и вариации скорости вращения Земли // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 3. С. 54–63. <https://elibrary.ru/rqzlx>
- Буллен К. Плотность Земли. М. : Мир. 1984. – 446 с.
- Джекобс Дж. Земное ядро. М. : Мир. 1979. – 303 с.
- Жарков В.Н. Физика Земных недр. М. : Наука и образование. 2012. – 384 с.
- Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. М. : Недра. 1985. – 400 с.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В. О связи скорости вращения Земли и ее сейсмической активности // Доклады академии наук. 2015. Т. 464. № 3. С. 351–355. <https://doi.org/10.7868/S0869565215270183>
- Левин Б.В., Сасорова Е.В. О влиянии скорости вращения Земли на глобальную сейсмичность (по материалам наблюдений с 1720 по 2016 гг.) // Геосистемы переходных зон. 2017. № 3. С. 3–20. <https://elibrary.ru/zgcswb>
- Левин Б.В., Сасорова Е.В., Гурьянов В.Б., Ярмолюк В.В. Связь глобальной вулканической активности и вариаций скорости вращения Земли // Доклады академии наук. 2019. Т. 484. № 6. С. 729–733. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846729-733>
- Линьков Е.М. Сейсмические явления. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та. 1987. – 248 с.
- 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. <https://doi.org/10.31857/S0002333721020046>
- Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М. : Мир. 1990. – 584 с.
- Милоков В.К. Наблюдение тонкой структуры основной сфероидальной моды Земли ${}_0S_2$ // Физика Земли. 2005. № 4. С. 16–22. <https://elibrary.ru/hrzbbx>
- Милоков 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. <https://elibrary.ru/ndixdt>
- Милоков 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. <https://doi.org/10.7868/S0002333715010093>
- Сергиенко А.Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации; особенности реализации в МАТЛАБ // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 1 С. 18–28. <https://elibrary.ru/taxzcf>
- Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М. : Наука, Физматлит. 2002. – 384 с.
- Соболев Г.А. Пульсации собственных колебаний Земли // Физика Земли. 2015. № 3. С. 3–12. <https://doi.org/10.7868/S0002333715030163>
- Стоунли В. Колебания Земли. Собственные колебания Земли. М. : Мир. 1964. С. 11–32.
- Тиссен В.М., Малкин З.М. Тренды и вариации в неравномерностях вращения Земли // Вестник С.-Петербург. Университета. 2021. Т. 8. № 1. С. 167–178. <https://doi.org/10.21638/spbu.2021.115>
- 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. <https://elibrary.ru/uzjtmr>
- Уидроу Б., Гловер Д.Р., Макул Д.М. Адаптивные компенсаторы помех. Принципы построения и применения // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. ТИИЭЗ. 1975. Т. 63. № 12. С. 69–98.
- Уткин В.И., Цурко И.А. О связи неравномерности вращения и сейсмичности Земли // Уральский геофизический вестник. 2010. № 2. С. 53–60. <https://elibrary.ru/rbmpof>
- 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. <https://elibrary.ru/pwpyl>
- Швед Г.М., Голицын Г.С., Ермоленко С.И., Кукуликина А.Е. Связь длиннопериодных собственных колебаний Земли с процессами в атмосфере // Доклады академии наук. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319. <https://doi.org/10.31857/S086956520001386-7>

- Alterman J., Pekeris C.L., Jarodch H. Oscillations of the Earth // Proc. Roy. Soc. Am. 1959. Vol. 252. P. 80. <https://doi.org/10.1098/rspa.1959.0138>
- Bendick R., Bilham R. Do weak global stresses synchronize earthquakes? // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 8320–8327. <https://doi.org/10.1002/2017GL074934>
- Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes // Geophys. J. Intern. 1987. Vol. 91 (3). P. 569–596. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1987.tb01659.x>
- Dahlen F.A. The normal modes of a rotating, elliptical Earth // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1968. Vol. 16. P. 329–367. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1968.tb00229.x>
- Dahlen F.A., Sailor R.V. Rotational and elliptical splitting of the oscillations of the Earth // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1979. Vol. 58 (3). P. 609–623. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1979.tb04797.x>
- Derr J.S. Internal structure of the Earth inferred from free oscillations // J. Geophys. Res. 1969. Vol. 74 (22). P. 5202–5220. <https://doi.org/10.1029/JB074i022p05202>
- Fukao Y., Nishida N., Suda N., Nawa R., Kobayashi N. A theory of the Earth's background free oscillations // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. <https://doi.org/10.1029/2001JB000153>.
- Geller R.J., Strein S. Split free oscillation of the 1960 Chilean and 1961 Alaskan earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1977. Vol. 67 (3). P. 651–660. <https://doi.org/10.1785/BSSA0670030651>
- Gilbert J.F., Backus G.T. Approximate solutions to the inverse normal mode problem // Bull. Seism. Soc. Am. 1968. Vol. 58. P. 103–131. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580010103>
- Lamb H. On the vibrations of an elastic sphere // Proc. Lond. Earth. Soc. 1982. Vol. 13 (189). <https://doi.org/10.1112/plms/s1-13.1.189>
- Lyubushin A.A. Trends of global seismic noise properties in connection to irregularity of Earth's rotation // Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177 (2). P. 621–636. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02331-z>
- Proverbio E. The periods of organization of the International Latitude Service: 1889 – 1999 // Astron. Soc. Pacif: conference series. 2000. Vol. 208. P. 187–193. <https://doi.org/10.1017/50252921100061261>
- Shanker D., Kapur N., Singh V. On the spatio temporal distribution of global seismicity and rotation of the Earth – A review // Acta Geod. Geophys. Hung. 2001. Vol. 36. P. 175–187. <https://doi.org/10.1556/AGeod.36.2001.2.5>
- Suda N., Nawa K., Fukao Y. Earth's background free oscillations // Science. 1998. Vol. 79. P. 2089–2091. <https://doi.org/10.1126/science.279.5359.2089>
- Tanimoto T. Continuous free oscillations: atmosphere-solid Earth coupling // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2001. Vol. 29. P. 563–584. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.563>
- Winch D.E., Bolt B.A., Slauicajts L. Geomagnetic fluctuations with the frequencies of torsional oscillations of the Earth // J. Geophysical Res. 1963. Vol. 68 (9). P. 2685–2693. <https://doi.org/10.1029/JZ068i009p02685>

THE EFFECT OF THE EARTH'S ROTATION SPEED TO THE FREQUENCY OF THE FUNDAMENTAL MODE ${}_0S_2$

© 2024 A. A. Spivak^{1, *}, D. N. Loktev¹, A. V. Tikhonova¹, V. A. Kharlamov¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

The frequency of the fundamental mode F of the Earth's natural oscillations ${}_0S_2$, identified in the spectra of geomagnetic variations at the Mikhnevo observatory of the IDG RAS, during strong earthquakes is analyzed. It is shown that the value of F takes different values depending on the date of the event, and the values of F are higher during periods characterized by a decrease in the Earth's rotation rate, and lower during periods of its increase. Based on the results of a comparative analysis of the results of magnetic measurements and the data of the IERS open access catalog, an empirical relationship was obtained between the variations in F and the Earth's rotation rate.

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