

УДК 551.242

© С. И. Ермоленко, Г. М. Швед

Санкт-Петербургский государственный университет

g.shved@spbu.ru

## ГЕНЕРАЦИЯ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗЕМЛИ АТМОСФЕРНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

Статья поступила в редакцию 29.04.2016, после доработки 24.10.2016.

Сфероидальные собственные колебания Земли  ${}_0S_n$ , где  $n$  — количество узлов колебания вдоль меридиана между полюсами, наблюдаются в сейсмически спокойные периоды. Сейсмометрические исследования этих фоновых собственных колебаний Земли с  $n = 12—65$ , возбуждаемых в диапазоне частот 2—7 мГц (периоды ~8—2 мин), показывают, что собственные колебания Земли связаны с процессами в атмосфере. Предлагается следующий механизм возбуждения этих собственных колебаний Земли. При сильных штормах возникают высокие волны, которые, в свою очередь, возбуждают океанические внутренние гравитационные волны. Последние, действуя на морское дно, генерируют собственные колебания Земли. Настоящее исследование посвящено поиску источника возбуждения фонового собственного колебания Земли  ${}_0S_n$ , которое имеет частоту около 0.3 мГц (период ~54 мин) и является самым низкочастотным. Непрерывные измерения в вертикальном канале сейсмометра STS-2 в Кольмской обсерватории за весь 2002 г. использованы для построения частотных спектров по 5-суточным рядам, последовательно смещаемым во времени с шагом 1 сутки. Величины спектральной интенсивности на частотах мультиплета  ${}_0S_2$  и близких к ним частотах сопоставляются с величинами индекса Арктической осцилляции, который характеризует степень динамического возмущения атмосферы северного полушария. Положительные статистически значимые коэффициенты корреляции между указанными величинами впервые показывают, что фоновые собственные колебания Земли  ${}_0S_n$  могут возбуждаться динамическими процессами в атмосфере подобно тому, как это имеет место для высокочастотных собственных колебаний Земли.

**Ключевые слова:** собственные колебания Земли, взаимодействие геосфер.

S. I. Ermolenko, G. M. Shved

Saint-Petersburg State University, Russia

## EXCITATION OF EARTH'S FREE OSCILLATIONS BY ATMOSPHERIC MOTIONS

Received 29.04.2016, in final form 24.10.2016.

Spheroidal Earth's free oscillations  ${}_0S_n$ , where  $n$  is the number of oscillation nodes along a meridian between the poles, are observed during seismically quiet days. The seismometer measurements of these background Earth's free oscillations with  $n = 12—65$ , located at frequencies of 2—7 mHz (periods ~8—2 min), show that the Earth's free oscillations are caused by atmospheric processes. The following mechanism for excitation of the Earth's free oscillations is proposed. During strong storms high waves generate oceanic internal gravity waves, which excite, in turn, Earth's free oscillations acting on the seabed. The present study is devoted to the search for the excitation source of background Earth's free oscillations  ${}_0S_2$ , which is located at the frequency of about 0.3 mHz (period of about 54 min) and is the lowest frequency Earth's free oscillations. We have used the continuous measurements of the vertical ( $Z$ ) output signal of STS-2 seismometer at Collm, Germany (51.3°N, 13.0°E), for the full year of 2002. The spectral analysis was applied over the 5-day window sliding along the annual series of the seismometer measurements with 1-day step. The values of power spectral density at the frequencies of the  ${}_0S_2$  multiplet and the frequencies close to them are matched with the values of the Arctic oscillation index, which characterizes the intensity of dynamic perturbation of the atmosphere in the Northern hemisphere. It is found that the correlation coefficients between these values are positive and statistically valid. So, it is shown for the first time that the background Earth's free oscillations  ${}_0S_2$  can be excited by dynamic processes in the atmosphere, just as it is for high-frequency Earth's free oscillations.

**Key words:** Earth's free oscillations, interaction of geospheres.

Ссылка для цитирования: Ермоленко С.И., Швед Г.М. Генерация собственных колебаний Земли атмосферными движениями // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 4. С. 3—6.

For citation: Ermolenko S. I., Shved G. M. Excitation of Earth's free oscillations by atmospheric motions. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 4, 3—6

Сильные землетрясения возбуждают сфероидальные собственные колебания Земли (СКЗ) основного тона  ${}_0S_n$  [1]. У СКЗ основного тона нет узлов колебания от центра Земли до поверхности, что обозначается индексом «0»; индекс « $n$ » означает, что вдоль меридиана между полюсами колебание имеет  $n$  узлов. Предметом настоящего исследования является самое низкочастотное СКЗ  ${}_0S_2$  с периодом около 54 мин, которое вращением планеты расщепляется на 5 компонент с частотами  $\nu_m = 300.0, 304.6, 309.2, 313.8$  и  $318.4$  мкГц [2]. СКЗ  ${}_0S_2$  обнаруживается также в сейсмически спокойные периоды [3, 4]. Поэтому возник вопрос, что является источником генерации колебаний при низком уровне сейсмической активности. Данное исследование является первым, где проверяется гипотеза о генерации СКЗ  ${}_0S_2$  динамическими процессами в атмосфере.

**Исходные данные.** Сведения по СКЗ  ${}_0S_2$  получены на основании ряда непрерывных измерений в вертикальном канале сейсмометра STS-2, конструкция которого описана в [5]. Измерения проводились в Кольмской обсерватории (Германия;  $51.3^\circ$  N,  $13.0^\circ$  E) в течение всего 2002 г. Шаг дискретизации измерений — 1 с.

В качестве характеристики динамической активности атмосферы был взят ежесуточно вычисляемый индекс Арктической осцилляции (АО) в 2002 г. [6]. Индекс АО характеризует ежесуточное отклонение от среднего значения величины, описывающей широтное изменение среднезональной высоты поверхности давления 1000 гПа выше  $20^\circ$  широты в северном полушарии.

**Обработка данных.** Анализ данных сейсмометра проводился для измерений, усредненных по 5-минутным интервалам. Перед проведением спектрального анализа ряды измерений были подвергнуты фильтрации, чтобы исключить влияние интенсивных низкочастотных колебаний на высокочастотную часть регистрируемого спектра колебаний. Фильтрация проводилась по методу Ланцоша [7] с частотой обрезания спектра 200 мкГц. Мы подвергали спектральному анализу 5-суточные ряды, последовательно смещаемые во времени с шагом 1 сут (выбор длины ряда обоснован в [4]). Спектральный анализ выполнялся по методу Ломба—Скаргла [8]. Спектры представлялись с шагом по частоте 1.16 мкГц. Статистическая значимость спектральных пиков оценивалась по отношению к спектру белого шума [9]. Пример 5-суточного спектра представлен на рис. 1 в [4].

В соответствие каждому 5-суточному спектру ставился индекс АО, усредненный по 5 сут. Для имеющихся данных был рассчитан коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}},$$

где  $x_i$  — значение спектральной интенсивности в  $i$ -ом спектре на заданной частоте;  $\bar{x}$  — среднее значение спектральной интенсивности по всем спектрам на этой частоте;  $y_i$  — значение индекса АО для  $i$ -ой пятидневки;  $\bar{y}$  — среднее значение индекса АО для всех пятидневок;  $N$  — количество спектров (пятидневок). В нашем случае  $N = 242$ . Значения  $x_i$  для частоты каждой компоненты  $\nu_m$  СКЗ  ${}_0S_2$  были найдены путем линейной интерполяции спектральной интенсивности в двух ближайших к  $\nu_m$  точках спектра. Кроме этого, для коэффициента корреляции был рассчитан уровень статистической значимости [10]

$$r_s = \pm \frac{t_{\infty(1-p/2)}}{\sqrt{N + t_{\infty(1-p/2)}^2}},$$

где  $t_{\infty(1-p/2)}$  — квантиль распределения Стьюдента;  $p$  — уровень значимости.

**Результаты и обсуждение.** Коэффициент корреляции для каждой из компонент СКЗ  ${}_0S_2$  представлен на рис. 1. Как мы видим, для 4-х из 5 компонент значения коэффициентов корреляции являются статистически значимыми. Как указано выше, индекс АО характеризует среднезональное изменение поверхностного давления вдоль меридиана выше  $20^\circ$  с.ш., причем индекс растет с уменьшением давления на высоких широтах по сравнению со средними широтами. Согласно уравнению геострофического ветра, чем сильнее убывает давление по направлению к полюсу, тем сильнее дующий на восток зонально усредненный ветер. Следовательно, чем больше индекс АО, тем сильнее динамически возмущена

атмосфера. Но если источником колебания Земли являются атмосферные процессы, то естественно ожидать положительных значений коэффициента корреляции, что, как раз, нами получено.

Мы также произвели расчет коэффициента корреляции для более широкого диапазона частот (50—325 мкГц), причем в интервале частот, занимаемым мультиплетом  ${}_0S_2$ , брались частоты, не совпадающие с частотами  $\nu_m$ . Результаты расчета представлены на рис. 2. Здесь мы видим, что значения коэффициента корреляции превысили уровень значимости 90 % в основном в высокочастотной области диапазона на частотах близких к частотам СКЗ  ${}_0S_2$ . Поскольку СКЗ являются неустойчивыми колебаниями, их частоты сильно варьируют. Поэтому можно думать, что на данном рисунке статистически значимые коэффициенты корреляции для частот больше 270 мкГц тоже принадлежат СКЗ  ${}_0S_2$ .

На рубеже XX и XXI вв. сразу двумя группами сейсмологов было убедительно показано наличие постоянных (фоновых) СКЗ от  ${}_0S_{12}$  до  ${}_0S_{65}$  в интервале частот 2—7 мГц (периоды ~8—2 мин) [11, 12]. Уровень возбуждения (гула) фоновых СКЗ оказывается достаточно большим — соответствует возбуждению СКЗ при землетрясениях с магнитудой  $M = 5.75—6.0$ . Этот уровень настолько велик, что не может быть объяснен эффектом простого сложения действия слабых землетрясений, как было показано расчетом синтетических спектрограмм [11] и численными оценками [13]. Поэтому динамические процессы в атмосфере и океанах стали претендентами на механизмы возбуждения фоновых СКЗ.

Прежде всего, были сделаны попытки найти корреляцию между интенсивностями фоновых СКЗ и годовым ходом атмосферных процессов. Было показано, что указанная интенсивность четко демонстрирует годовые и полугодовые периодичности с большим пиком в июле и вторичным пиком в январе [14—16]. Эти периодичности естественно связали с усилением динамической активности атмосферы в зимы северного и южного полушарий.

По годичным измерениям сейсмометрами STS-1 в диапазоне частот 3—7 мГц на 14 станциях были представлены статистические характеристики фоновых СКЗ  ${}_0S_n$  [17]. Во-первых, получено, что амплитуда каждой моды флуктуирует со временем. Во-вторых, появление даже соседних по частоте мод оказалось не скоррелированным. Однако сигнал по сумме всех СКЗ существует всегда. Эти результаты позволили предположить, что источником возбуждения СКЗ  ${}_0S_n$  являются глобальные вариации атмосферного приземного давления, обусловленные, по выражению сейсмологов, «атмосферными турбулентными движениями», а конкретнее — мезо- и макромасштабными вихрями, являющимися проявлениями двумерной атмосферной турбулентности. С помощью подхода, используемого в солнечной сейсмологии для доказательства стохастического возбуждения солнечных  $p$ -мод, было показано, что случайные вариации атмосферного давления способны возбуждать СКЗ  ${}_0S_n$  вплоть до их наблюдаемых амплитуд [13, 15]. Учитывая механизмы воздействия случайных колебаний атмосферного давления на силу тяжести, позже удалось получить синтетические спектры вариаций этой силы, совпадающие со спектрами, полученными для рядов наблюдений [18].

В статье [19] впервые осуществлена попытка поиска локализации источников рассматриваемых СКЗ на земном шаре. Поиск проводился, во-первых, путем сопоставления направления сигналов,

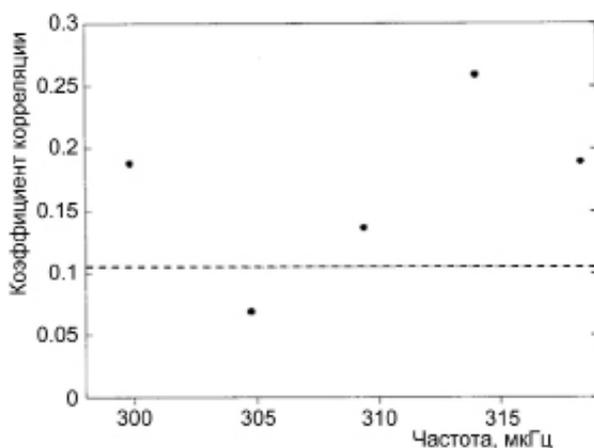


Рис. 1. Значения коэффициента корреляции для пяти компонент собственного колебания Земли  ${}_0S_2$ . Пунктирная линия — уровень значимости 90 %.

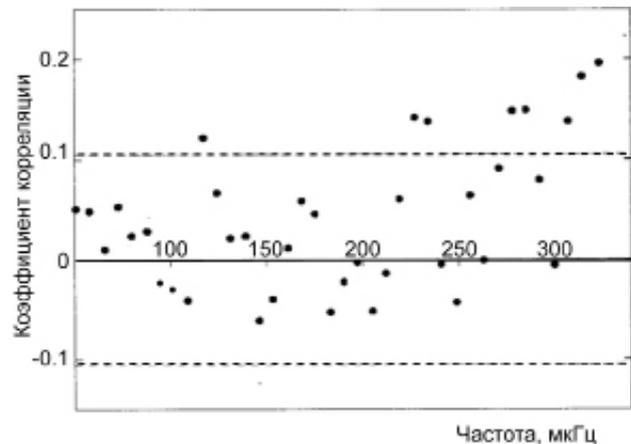


Рис. 2. Значения коэффициента корреляции для частот в диапазоне 50—325 мкГц. Пунктирная линия — уровень значимости 90 %.

регистрируемых двумя группами сейсмометров (в Калифорнии и Японии) и, во-вторых, выявления областей высоких волн при сильных штормах. Основными источниками фоновых СКЗ оказались северный Тихий океан в зиму северного полушария и так называемый Южный океан вокруг Антарктиды в зиму южного полушария. Таким образом, воздействие динамических процессов в атмосфере на твердую Землю передается через возбуждаемые ветром океанические гравитационные волны, взаимодействующие с морским дном. Путем построения кросскорреляционных спектров для показаний пар сейсмометров STS-1 из набора 54 сейсмометров, распределенных по всему земному шару, вышеупомянутая локализация источников СКЗ качественно была подтверждена [20]. Уточнение касается зимы в южном полушарии: основной источник представляет собой полосу от западной части Тихого океана к его восточной части через южные части Атлантического и Индийского океанов.

\*\*\*

Сопоставлением спектров сейсмических осцилляций с атмосферным индексом АО впервые показано, что источником фоновых СКЗ  ${}_0S_2$  могут быть динамические процессы в атмосфере. Данный результат совпадает с выводами об атмосферном первоисточнике СКЗ  ${}_0S_n$  в диапазоне частот 2—7 мГц, которые на порядок и более превышают частоты СКЗ  ${}_0S_2 \sim 0.3$  мГц. Но если указанные высокочастотные СКЗ возбуждаются действием на дно океана морских внутренних гравитационных волн, образующихся при создаваемом ветром волнении поверхности океана, то в случае СКЗ  ${}_0S_2$  данный механизм может рассматриваться только как правдоподобная гипотеза, нуждающаяся в проверке.

### Литература

1. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука ГРФМЛ, 1983. 416 с.
2. Rosat S. et al. High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004  $M_w = 9$  Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L13304. doi:10.1029/2005GL023128.
3. Линьков Е. М., Петрова Л. Н., Зурошвили Д. Д. Сейсмогравитационные колебания Земли и связанные с ними возмущения атмосферы // Доклады АН СССР. 1989. Т. 306. С. 314—317.
4. Швед Г. М., Ермоленко С. И., Хоффманн П. Регистрация собственных колебаний атмосферы в диапазоне периодов 1-5 часов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. С. 562—569.
5. Wielandt E. Seismometry // *International handbook of earthquake and engineering seismology* / (Eds.) Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C., Kisslinger C. Academic Press. London and San Diego, 2002. P. 283—304.
6. Climate Prediction Center (CPC), Daily Arctic Oscillation Index: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks/norm.daily.ao.index.b500101.curren.ascii> (дата обращения: 27.04.2016).
7. Duchon C. E. Lanczos filtering in one and two dimensions // *J. Appl. Meteorol.* 1979. V. 18. P. 1016—1022.
8. Press W. H. et al. Numerical recipes in FORTRAN 77: The art of scientific computing. New York: Cambridge Univ. Press, 1997. P. 569—577.
9. 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.
10. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука ГРФМЛ, 1968. 288 с.
11. Nawa K. et al. Incessant excitation of the Earth's free oscillations // *Earth Planets Space.* 1998. V. 50. P. 3—8; Reply V. 50. P. 887—892. 1998.
12. Tanimoto T. et al. Earth's continuous oscillations observed on seismically quiet days // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1553—1556.
13. Tanimoto T., Um J. Cause of continuous oscillations of the Earth // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104(B). P. 28,723—28,739.
14. Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Resonant oscillations between the solid earth and the atmosphere // *Science* 2000. V. 287. P. 2244—2246.
15. Tanimoto T. Excitation of normal modes by atmospheric turbulence: Source of long period noise // *Geophys. J. Int.* 1999. 136. P. 395—402.
16. Ekstrom G. Time domain analysis of Earth's long-period background seismic radiation // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 26,483—26,494.
17. Nishida K., Kobayashi N. Statistical features of Earth's continuous free oscillations // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104(B). P. 28,741—28,750.
18. Fukao Y. et al. A theory of the Earth's background free oscillations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107(B9). 2206. doi:10.1029/2001JB000153.
19. Rhie A., Romanowicz B. Excitations of the earth's incessant free oscillation by atmosphere/ocean/solid Earth coupling // *Nature.* 2004. V. 431. P. 552—556.
20. Nishida K., Fukao Y. Source distribution of Earth's background free oscillations // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. B06306. doi:10.1029/2006JB004720.