

УДК 550.334

## НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ШУМ ДО И ПОСЛЕ МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СУМАТРА 26 ДЕКАБРЯ 2004 г.

Член-корреспондент РАН Г. А. Соболев

Поступило 20.11.2018 г.

Изучены записи 59 идентичных широкополосных сейсмических станций, расположенных в разных районах земного шара, до и после землетрясения Суматра 26 декабря 2004 г. с  $M=9,1$ . Проанализированы колебания в диапазоне периодов от 40 до 360 с. Станции, расположенные на расстояниях в несколько сотен километров друг от друга, демонстрировали различные по форме и времени возникновения импульсы на периодах 40–80, 80–160 и 160–320 с, что свидетельствует о локальных атмосферных источниках сейсмического шума. Экспоненциальный рост спектральной амплитуды шума по мере удлинения периода соответствует теории А.Н. Колмогорова локально изотропной турбулентности в атмосфере. Уровень шума возрос после землетрясения Суматра в 2 раза как на станциях, расположенных в сейсмоактивных зонах субдукции, так и на платформах.

*Ключевые слова:* сейсмический шум, землетрясение, сейсмостанции, турбулентные процессы, атмосфера.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-56524854497-501>

После создания в 90-х годах XX в. глобальной системы широкополосных сейсмических станций появился ряд исследований сейсмических шумов в диапазоне периодов  $10^2$ – $10^3$  с. В работе [1] изучались ускорения по данным гравиметра IDA и сейсмических записей GEOSCOPE. Показано, что на частотах 2–7 мГц (140–500 с) в сейсмически спокойные дни наблюдаются непрерывные колебания на уровне  $10^{-9}$  Гал. Предлагались два возможных механизма их возникновения: медленные землетрясения и процессы в атмосфере. В исследовании [2] предложен эффективный метод выделения слабых сейсмических колебаний при сопоставлении волн, неоднократно обтекающих земную поверхность. В результате совместного анализа вертикальных компонент сейсмограмм станций системы GSN автор пришёл к выводу, что постоянно существующие волны Рэлея в диапазоне периодов 200–400 с не связаны с гипотетическими медленными землетрясениями, а вызываются турбулентностью воздушных масс в атмосфере. Авторы [3] изучили записи 49 широкополосных станций системы IRIS с приборами STS-1. В результате анализа методом наложения эпох в сейсмическом шуме на периодах 50–500 с удалось выделить некоторые собственные сфероидальные колебания Земли. Их природа связывалась с непрерывным существованием хаотично распределённых источников в атмосфере. Целью настоящей работы было детальное изучение структуры

сейсмического шума в диапазоне периодов 40–360 с до и после мегаземлетрясения Суматра 26 декабря 2004 г. с  $M=9,1$  по данным распределённых по земному шару сейсмических станций.

Экспериментальную базу составили записи сейсмических станций IRIS сейсмометрами STS-1, обеспечивавшими регистрацию скорости перемещения грунта в широком диапазоне периодов на стандартной аппаратуре [4]. Полученные по сети Интернет записи вертикальных компонент LHZ были усреднены в 10 раз. Анализировался шум в январе 2004 г. и январе 2005 г. На записях каждой станции выделялись участки, свободные от землетрясений, техногенных помех и возрастания шума при прохождении циклонов. Их отбор проводили по следующим правилам. Вначале визуально выбирали участки между интервалами повышенного шума, не содержащие всплесков от землетрясений или техногенных помех. Вычисляли величину среднеквадратического отклонения шума  $\sigma$  в выбранном участке; величина  $\Delta\sigma$  на всём протяжении участка не должна была превышать 20%. Таким образом, каждый спокойный участок характеризовался устойчивым уровнем амплитуды шума. В то же время допускалась разница  $\Delta\sigma$  в амплитуде разных спокойных участков на всём месячном интервале анализа; на практике оказалось, что она не превышает 80%. Продолжительность спокойных участков суммировалась. В результате в записях конкретной станции удавалось выделить суммарные интервалы спокойного шума длительностью порядка 100 ч.

На графиках 1 и 2 рис. 1 показаны амплитуды перемещений грунта в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. и январе 2005 г. на расположенной в Южной Америке станции LVC [22,613° ю.ш. — 68,911° з.д.]. Выборки состоят из равного числа отсчетов — 32 341. Амплитуды перемещений были получены после интегрирования регистрируемой станцией скорости перемещения грунта. Были рассчитаны спектры Фурье и авторегрессионной оценки спектра мощности AR. На последних лучше выделяются пики в случае нестационарной выборки, например, после землетрясения. Но в нашем случае в интервалах спокойного шума существенных различий между ними не было найдено. Полученные спектры мощности Фурье представлены на графиках 3 (2004 г.) и 4 (2005 г.) рис. 1. Мы ограничились диапазоном периодов от 50 до 360 с, в котором станции с сейсмометром STS-1 имеют равную и максимальную чувствительность. Анализ графиков 3 и 4 приводит к следующим выводам. В обоих случаях спектральная мощность амплитуды смещений  $S$  в функции периода  $P$  описывается экспоненциаль-

ным законом (обобщающие прямые линии) при коэффициенте детерминации  $R^2$ :

$$S = 1,4 \exp(0,01P), R^2 = 0,9 \text{ (2004 г.)}, \quad (1)$$

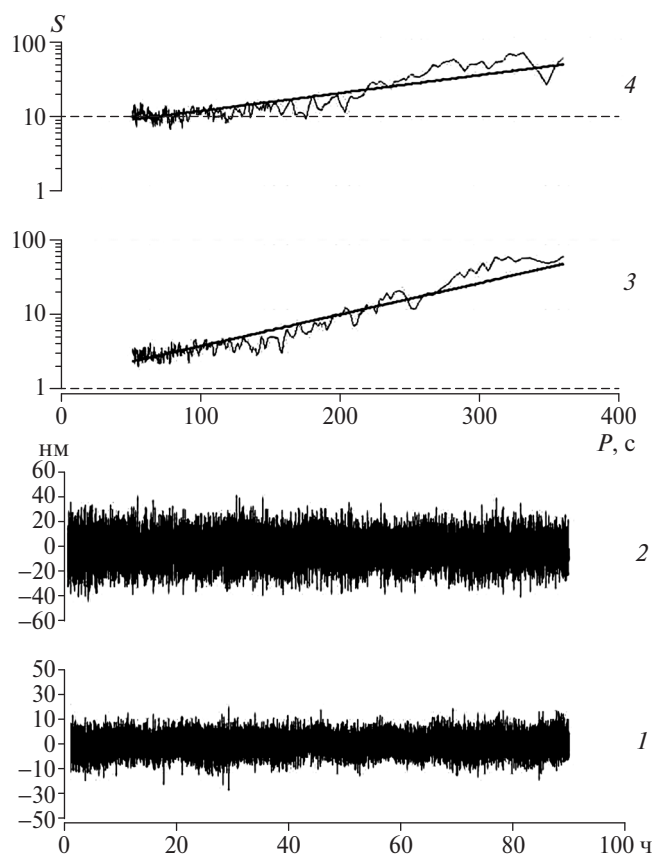
$$S = 6,8 \exp(0,006P), R^2 = 0,74 \text{ (2005 г.)}. \quad (2)$$

Уровень спектра 2005 г. (график 4) выше по сравнению с уровнем 2004 г. (график 3), что соответствует разнице в амплитудах колебаний (графики 2 и 1). Заметно также, что на коротких периодах <120 с точки распределены с меньшим наклоном относительно оси абсцисс. На рис. 2 такого же типа графики шума и их спектры приведены для станции MAJO [36,55° с.ш. — 138,2° в.д.]. Эта станция расположена в Японии в зоне субдукции вблизи будущего катастрофического землетрясения Тохoku. Спектры зависимости мощности амплитуд от периода описываются уравнениями

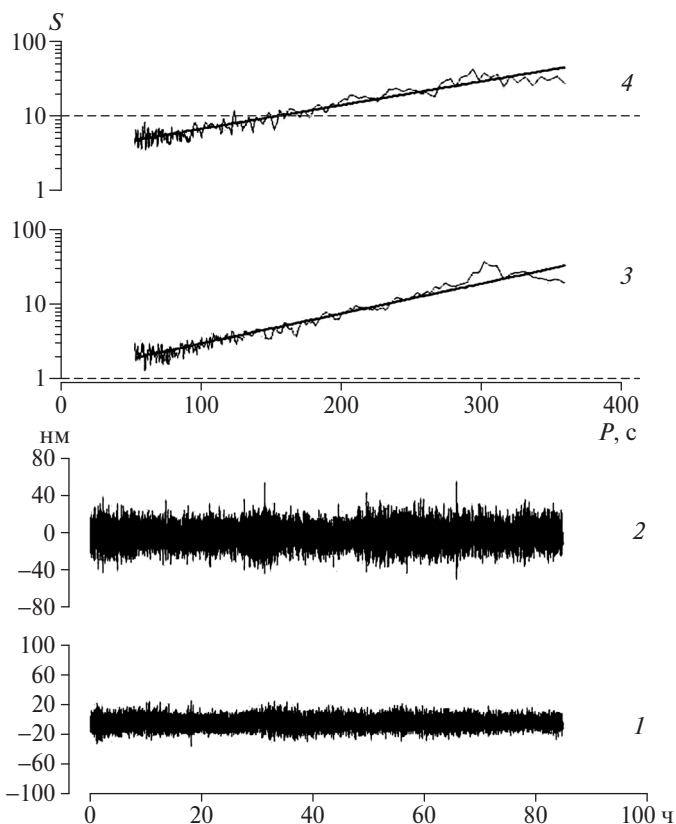
$$S = 11,9 \exp(0,009P), R^2 = 0,93 \text{ (MAJO, 2004 г.)}, \quad (3)$$

$$S = 32,3 \exp(0,007P), R^2 = 0,9 \text{ (MAJO, 2005 г.)}. \quad (4)$$

При сравнении результатов для 59 разных станций отмечены следующие особенности. Уровень



**Рис. 1.** Амплитуда вертикальных перемещений грунта на станции LVC (Перу) в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. (1) и январе 2005 г. (2); 3, 4 — спектры мощности Фурье этих колебаний.



**Рис. 2.** Амплитуда вертикальных перемещений грунта на станции MAJO (Япония) в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. (1) и январе 2005 г. (2); 3, 4 — спектры мощности Фурье этих колебаний.

шума в 2005 г. превышает уровень 2004 г. в 1,5–2 раза. Расчёты показали, что по критериям *jbtest* и *lillietest* распределения отличаются от нормального закона (гипотеза  $H = 1$ ). Анализ гистограмм приводит к предположению, что это связано с нарушением симметрии амплитуд колебаний положительной и отрицательной полярности на некоторых временных интервалах. Сравнивали также выборки равной длины 2004 и 2005 гг. с целью выявления их различий или сходства. Проверка с использованием непараметрических статистических критериев Смирнова—Колмогорова и Вилкоксона привела к выводу: выборки различаются на уровне доверия выше 95%. Отметим, что эти критерии не базируются на каком-либо законе распределения, а используют только предположения о случайном характере исходных данных [5]. Они эффективны также при малых выборках. Рост мощности спектра амплитуд смещений с увеличением периода колебаний описывается экспоненциальными зависимостями, аналогичными уравнениям (1)–(4), и не зависит от расположения станции.

Проанализирована структура шума в более детальной развёртке во времени (рис. 3). Для этой цели были выбраны две относительно близко расположенные (760 км) станции в Северной Америке: CMB [38,035° с.ш. — 110,785° з.д.], высота над уровнем моря  $H = 697$  м и COR [44,586° с.ш. — 123,303° з.д.],  $H = 121$  м. Удалось найти синхронные участки спокойного шума на обеих станциях 1 января 2005 г. длительностью 4,77 ч (1706 отсчётов). Графики на рис. 3 представляют значения перемещений грунта в диапазонах 40–80, 80–160 и 160–320 с. Применялась методика *Wavelet Packed Decomposition* из программы А. Любушина *SpAn* <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/967/71967/49364> [6]. Отметим следующие характеристики записей. Время появления всплесков шума в разных диапазонах и структура импульсов различаются для одной и той же станции (графики 1, 3, 5 и 2, 4, 6). Форма нарастания и спада импульсов разнообразна. Продолжительность участков повышенного шума изменяется от нескольких минут до получаса. Времена появления всплесков, их форма и длительность на двух соседних станциях различаются во всех диапазонах (графики 1, 2, 3 и 4, 5 и 6).

Спокойный шум в январе 2004 г. на станциях, расположенных в разных регионах планеты, характеризовался амплитудой смещения грунта 20–40 нм. В январе 2005 г. после мегаземлетрясения на Суматре 26.12.2004 г.,  $M = 9,1$ , он увеличился до 40–60 нм. Уровень шума на разных станциях в 2004 и 2005 гг.

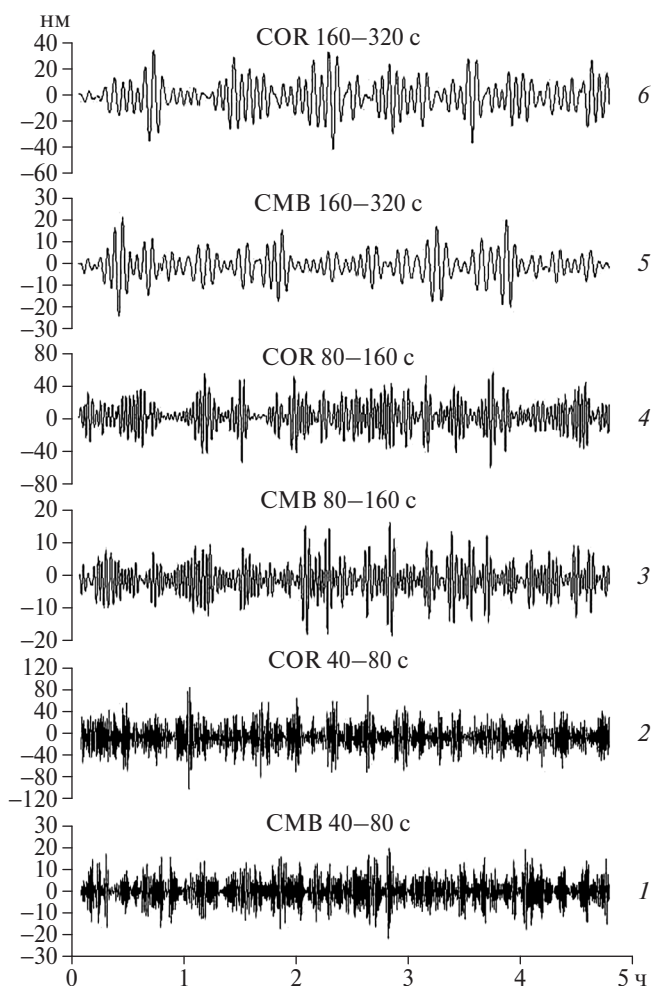


Рис. 3. Структура сейсмического шума на расположенных в 760 км друг от друга станциях CMB и COR в Северной Америке. Диапазоны шума указаны над графиками. Ординаты — амплитуды вертикальных перемещений грунта.

различен, несмотря на то, что станции имеют одинаковые амплитудно-частотные характеристики и при сопоставлении записей учтена чувствительность соответствующей станции. Отсюда следует предположение, что на запись шума влияют локальные особенности расположения станции. С другой стороны, интегральное сходство спектров мощности (графики 3 и 4, рис. 1, 2) говорит о влиянии глобального процесса. Не обнаружено закономерной разницы в уровне шума в зависимости от сеймотектонических условий расположения станции: сейсмоактивные зоны субдукции или малоактивные районы на материках. Ранее отмечалось [7] статистически значимое (модифицированный метод Дарлинга) увеличение после этого землетрясения дисперсии сейсмического шума на станциях, удалённых на тысячи километров от эпицентра. Возникновение после больших землетрясений низко-

частотных колебаний минутного диапазона периодов также не является необычным [8].

Какой физический процесс отражается в отмеченных выше свойствах шума? В работе [3] обсуждались два механизма возникновения сейсмического шума на периодах 50–500 с: 1) распределённые сейсмические источники небольшой магнитуды, не идентифицируемые существующей сетью сейсмических станций; 2) перемещения воздушных масс в атмосфере. В целом предпочтение отдано второму механизму. При этом в результате совместного анализа методом наложения эпох записей многих сейсмических станций в структуре шума были выделены постоянно существующие поверхностные волны Рэлея, в том числе на периодах собственных колебаний Земли. Нас интересуют источники спокойного шума отдельной сейсмической станции. Явное различие времён возникновения цугов колебаний на станциях СМВ и СОР (рис. 3) указывает на разное местоположение их источников. Особенно чётко это проявляется при больших периодах колебаний 160–320 с (графики 5, 6). Предположим, что колебания представляют собой поверхностные сейсмические волны Рэлея. Тогда их длина при скорости распространения  $\approx 3,5$  км/с измеряется величинами 560–1120 км. Она соизмерима с расстоянием между станциями СМВ и СОР примерно 760 км. В предположении единого сейсмического источника в твёрдой Земле следовало бы ожидать высокой степени синхронности колебаний, чего не обнаруживается. Таким образом, более правдоподобна гипотеза о том, что источник находится в атмосфере. Заметим, что полученные экспоненциальные закономерности (уравнения (1)–(4)) увеличения амплитуды спектра мощности с ростом периода качественно соответствуют созданной А.Н. Колмогоровым теории локально изотропной турбулентности в атмосфере [9–11]. Сейсмическая станция в этом

предположении регистрирует вертикальные деформации грунта, вызываемые перемещением масс в вихрях разного размера, мощности и пространственного расположения.

**Источник финансирования.** Работа поддержана грантом РФФИ № 18–05–00026.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tanimoto T., Um J., Nishida K., Kobayashi N.* Earth's Continuous Oscillations Observed on Seismically Quiet Days // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1553–1556.
2. *Ekstrom G.* Time Domain Analysis of Earth's Long-Period Background Seismic Radiation // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № B11. P. 26 483–26 493.
3. *Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y.* Origin of Earth's Ground Noise from 2 to 20 mHz // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 10. P. 52–1–52–4.
4. *Wieland E., Streckeisen G.* The Leaf-Spring Seismometer — Design and Performance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72. P. 2349–2367.
5. *Кулаичев А.П.* Методы и средства анализа данных в среде Windows. Stadia 6.0. М.: НПО Информатика и компьютеры, 1996. 256 с.
6. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. С. 228.
7. *Соболев Г.А.* Сейсмический шум. М.: Наука и образование, 2014. С. 272.
8. *Соболев Г.А.* Западный дрейф колебаний Земли после землетрясений // *ДАН.* 2017. Т. 472. № 2. С. 201–205.
9. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *ДАН.* 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.
10. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965/1967. Т. 1/2.
11. *Голицын Г.С., Мохов И.И., Куличков С.Н. и др.* Редакционная коллегия. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. М.: Геос, 2014. 696 с.



## LOW FREQUENCY SEISMIC NOISE BEFORE AND AFTER THE SUMATRA MEGAEARTHQUAKE DECEMBER 26, 2004

**Correspondent Member of the RAS G. A. Sobolev**

*O.Yu. Shmidt Institute of the Earth's Physics, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation*

Received November 20, 2018

The paper aims at detailed study of the structure of seismic noise before and after the Sumatra mega-earthquake with  $M = 9.1$  of December 26, 2004. The records by IRIS seismic stations in the different regions of the world, equipped with STS-1 seismometers providing ground motion velocity recording in a broad range of periods from 0.2 to 360 s with the use of standard equipment, form the empirical base of the research. In the records by each station, the intervals free of the earthquakes, interference of manmade impacts, and noise enhancement due to cyclone propagation were selected. The noise bursts in the ranges 40–80, 80–160, and 160–320 s differ by the shape and time of occurrence suggesting different sources of their generation. The absence of the correlation between the noise recordings at the neighboring seismic stations spaced 102 – 103 km apart indicates the influence of local processes. The noise reflects turbulent processes in the Earth's atmosphere whereas the exponential growth of the noise with the increase of the oscillation period is consistent with A.N. Kolmogorov's theory of locally isotropic turbulence in the atmosphere. The noise amplitude after the Sumatra mega-earthquake with  $M = 9.1$  of December 26, 2004 has increased by a factor of 1.5–2 in January 2005 compared to January 2004 irrespective of the location of a seismic station.

**Keywords:** seismic noise, earthquake, seismic stations, turbulent processes, atmosphere.