

УДК 550.334

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ГЛОБАЛЬНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

© 2019 г. Г. А. Соболев<sup>1\*</sup>, Н. А. Закржевская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

E-mail: sobolev@ifz.ru

Поступила в редакцию 27.08.2018 г.

Принята в печать 03.12.2018 г.

Целью работы было детальное изучение структуры сейсмического шума до и после мегаземлетрясения Суматра 26.12.2004 г. с  $M = 9.1$ . Экспериментальной базой являлись записи расположенных в разных районах мира сейсмических станций IRIS с сейсмометрами STS-1, обеспечивавших регистрацию скорости перемещения грунта в широком диапазоне периодов от 0.2 до 360 с на стандартной аппаратуре. На записях каждой станции выделялись участки, свободные от землетрясений, техногенных помех и возрастания шума при прохождении циклонов. Амплитуда устойчивого сейсмического шума в диапазоне 40–360 с, не осложненного записями землетрясений и эффектами метеорологического происхождения, составляет порядка 20–40 нм, что характеризует реальную разрешающую способность широкополосной сейсмической станции. Вспышки шума в диапазонах 40–80, 80–160 и 160–320 с различаются по форме и времени возникновения, что говорит о различии источников. Отсутствие корреляции записей шума на соседних сейсмических станциях, расположенных на расстоянии порядка 102–103 км, свидетельствует о влиянии локальных процессов. Шум отражает турбулентные процессы в атмосфере Земли, и его экспоненциальный рост с увеличением периода колебаний соответствует теории локально изотропной турбулентности в атмосфере А.Н. Колмогорова. Амплитуда шума после мегаземлетрясения Суматра 26.12.2004 г. с  $M = 9.1$  возросла в январе 2005 г. в 1.5–2 раза по сравнению с январем 2004 г. вне зависимости от расположения сейсмической станции.

*Ключевые слова:* землетрясение, колебания, пульсации, сейсмический шум, атмосфера, сейсмические станции.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-3337201943-14>

### ВВЕДЕНИЕ

После создания в 90-х годах глобальной системы широкополосных сейсмических станций появился ряд исследований сейсмических шумов в диапазоне периодов  $10^2$ – $10^3$  с. В работе [Tanimoto et al., 1998] изучались ускорения по данным гравиметра IDA и сейсмических записей GEOSCOPE. Было 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: кумулятивный эффект слабых землетрясений или процессы в атмосфере. В исследовании [Ekstrom, 2001] был предложен эффективный метод выделения слабых сейсмических колебаний при сопоставлении волн, неоднократно оббегающих земную поверхность. В результате совместного анализа

вертикальных компонент сейсмограмм широкопериодных станций системы GSN автор пришел к выводу, что постоянно существующие волны Релея в диапазоне периодов 200–400 с не связаны с гипотетическими медленными землетрясениями, а вызываются турбулентностью воздушных масс в атмосфере. Авторы статьи [Nishida, et al., 2002] изучили записи 49 долгопериодных 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 распределенных источников в атмосфере. В работе [Адушкин и др., 2008] обращалось внимание на влияние барических изменений в атмосфере на микросейсмические процессы в земной коре.

Целью настоящей работы было детальное изучение структуры сейсмического шума в диапазоне периодов 40–360 с до и после мегаземлетрясения Суматра 26.12.2004 г. с  $M = 9.1$ .

### МЕТОДИКА

Экспериментальной базой являлись записи сейсмических станций IRIS с сейсмометрами STS-1, обеспечивавших регистрацию скорости перемещения грунта в широком диапазоне периодов от 0.2 до 360 с на стандартной аппаратуре [Wieland, Streckeisen, 1982]. На рис. 1 показано расположение использованных в работе 59 станций (треугольники) и даны названия тех станций, результаты по которым приведены в последующих рисунках. Полученные по сети ИНТЕРНЕТ записи вертикальных компонент LHZ были подвергнуты усреднению в 10 раз.

На записях каждой станции выделялись участки, свободные от землетрясений, техногенных помех и возрастания шума при прохождении циклонов. Удобным инструментом для этой цели было использование методики *vinzoration* в программе SpAn [<http://window.edu.ru/library/pdf2txt/967/71967/49364>]; [Любушин, 2007]. При этом выполнялись операции итеративного устранения больших выбросов, вычисления среднего значения, стандартного отклонения  $\sigma$ , срезки значений временного ряда, выпадающих за уровни  $4\sigma$  и повторения этой последовательности

до тех пор, пока значения не перестанут меняться. Примеры получаемых при такой процедуре графиков показаны на рис. 2 (744 ч сут). График 1 представляет запись за январь 2004 г. станции ESK (55.317 с. ш. – 3.205° з. д.); она расположена в Шотландии на высоте 242 м над уровнем моря. График 2 демонстрирует запись за тот же период станции PAB (39.549 с. ш. – 4.348° з. д.), находящейся в Испании на высоте 950 м. Станция COR (44.588 с. ш. – 123.303° з. д.) (график 3) расположена в США на высоте 121 м; запись относится к январю 2005 г. Наиболее длительные участки пониженного – “спокойного” шума в качестве примера отмечены треугольниками. Их отбор проводился по следующим правилам. Вначале визуально выбирались участки между интервалами повышенного шума и не содержащие всплесков от землетрясений или техногенных помех. Вычислялась величина среднеквадратического отклонения шума  $\sigma$  в выбранном участке, и ее отклонение  $\Delta\sigma$  на всем протяжении участка не должно было превышать 20%. При удлинении участка не допускался рост  $\Delta\sigma$  выше этого значения, как правило, вследствие постепенного возрастания шума метеорологического происхождения или появлении сейсмических событий. Таким образом, каждый спокойный участок характеризовался устойчивым уровнем амплитуды шума. В то же время, допускалась разница  $\Delta\sigma$  в амплитуде разных спокойных участков на всем месячном интервале анализа; на практике оказалось, что она не превышает

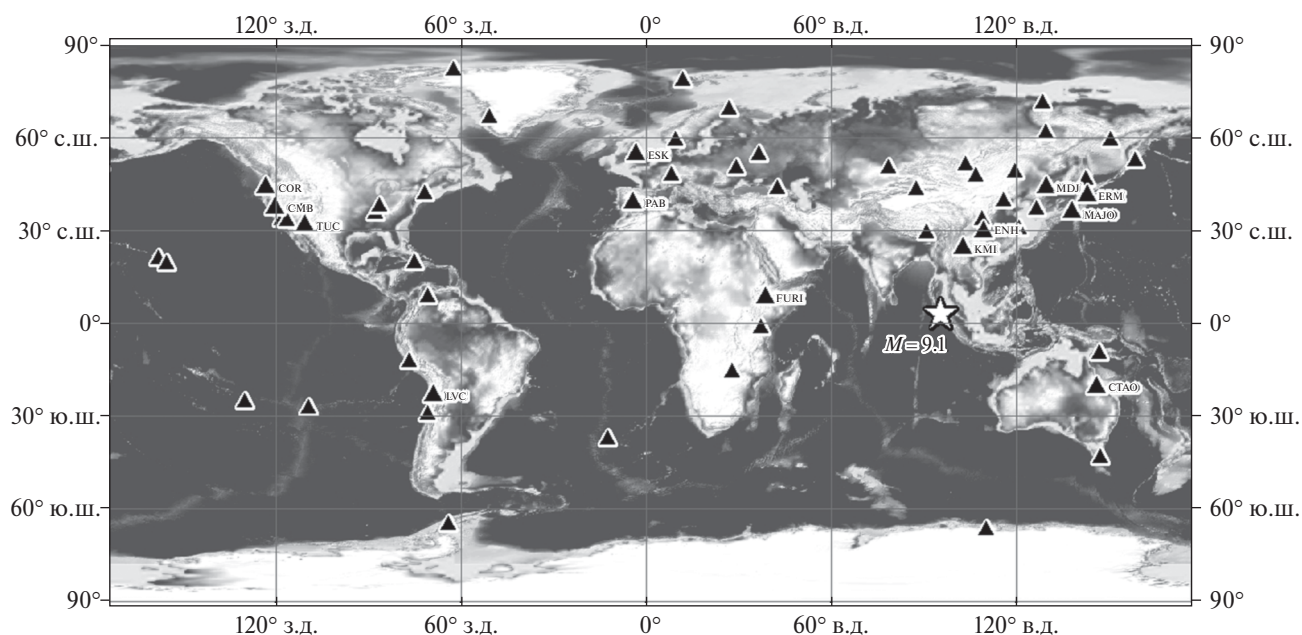
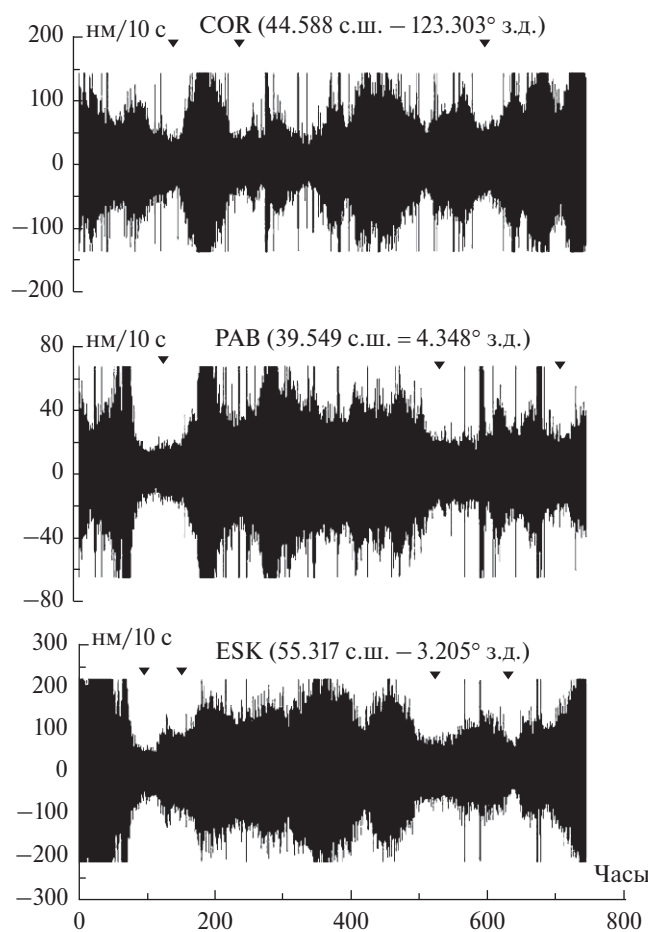


Рис. 1. Расположение широкополосных сейсмических станций, данные которых использованы в работе. Приведены названия станций, результаты по которым представлены в рисунках настоящей статьи.

80%. Продолжительность спокойных участков суммировалась. В результате, на конкретной станции удавалось выделить суммарные интервалы спокойного шума длительностью порядка 100 ч.

Сопоставление графиков 1 и 2 свидетельствует о некотором совпадении интервалов повышенного и спокойного шума в январе 2004 г. на станциях Европы ESK и PAB, находящихся на расстоянии 1700 км друг от друга. Длительность участков повышенного шума и их форма на записи станции COR в 2005 г. (график 3) примерно такая же, как на графиках 1 и 2 при различиях во времени их проявления. Мы избежали в настоящей работе использования записей станций, расположенных в центре городов или вблизи автомобильных магистралей и железных дорог. Эта информация представлена для каждой станции в SeismiQuery BREQ\_FAST Request Form – IRIS.url.



**Рис. 2.** Структура сейсмического шума на станциях ESK, PAB, COR, координаты которых указаны над графиками. Большие выбросы подавлены методикой винзоризации (см. текст). Треугольниками отмечены примеры интервалов спокойного шума.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На графиках 1 и 2 рис. 3 показаны интервалы 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 32341 отсчетов с интервалом 10 с. Были рассчитаны спектры Фурье и спектры AR (авторегрессионной оценки спектра мощности). На последних лучше выделяются пики в случае нестационарной выборки, например, после землетрясения. Но в нашем случае в интервалах спокойного шума существенных отличий между ними не было найдено, в связи с чем на графиках 3 и 4 демонстрируются только спектры Фурье. Напомним, что станции с сейсмометрами STS-1 регистрируют скорость смещения грунта. При сопоставлении спектров колебаний для разных станций и в различных временных интервалах было признано более удобным их представление в величинах смещений. В связи с этим амплитуды были перед вычислением спектров проинтегрированы по времени. Полученные спектры мощности Фурье представлены на графиках 3 (2004 г.) и 4 (2005 г.). 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 экспоненциальным законом (обобщающие прямые линии):

$$S = 1.4 \cdot \text{Exp} (0.01 P)$$

при коэффициенте детерминации

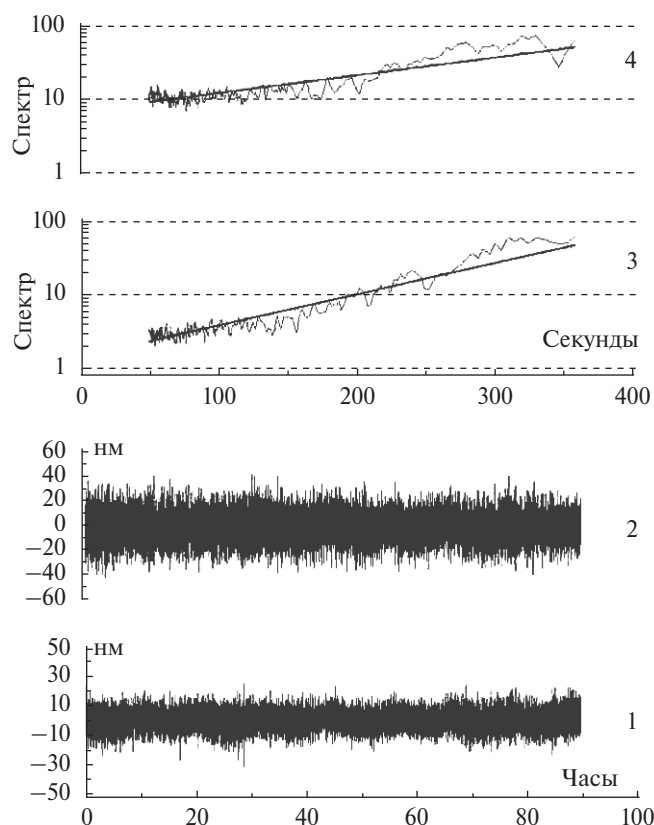
$$R^2 = 0.9 (2004 \text{ г.}), \quad (1)$$

$$S = 6.8 \cdot \text{Exp} (0.006 P),$$

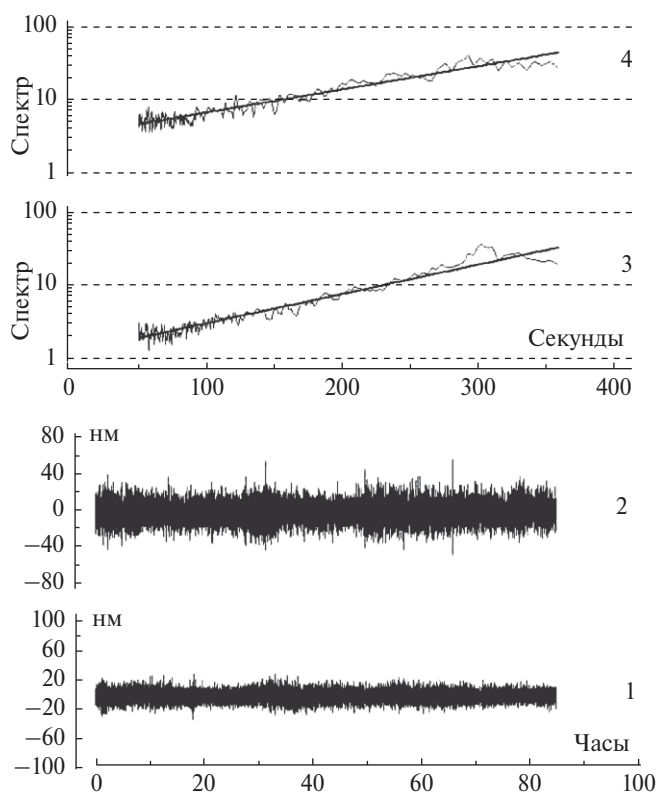
$$R^2 = 0.74 (2005 \text{ г.}). \quad (2)$$

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 < 100 с точки распределены с меньшим наклоном относительно оси абсцисс.

На рис. 4. – рис. 7 такого же типа графики шума и их спектры приведены для других станций: MAJO (36.55 с.ш. – 138.2° в.д.), MDJ (44.616 с.ш. – 129.592° в.д.), TUC (32.31 с.ш. – 110.785° з.д.), СТАО (20.088 ю.ш. – 146.255° в.д.) (см. рис. 1). Станция MAJO (рис. 4) расположена в Японии, в зоне субдукции, вблизи будущего катастрофического землетрясения Тохоку. Станция MDJ (рис. 5) – на континенте Северо-Восточной Азии (Китай). Станция TUC



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



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

(рис. 6) – в Северной Америке, США. Станция СТАО (рис. 7) – в Австралии. Зависимости амплитуд от периода описываются уравнениями:

$$S = 11.9 \cdot \text{Exp}(0.009 P), \quad R^2 = 0.93 \text{ (MAJO, 2004)}, \quad (3)$$

$$S = 32.3 \cdot \text{Exp}(0.007 P), \quad R^2 = 0.9 \text{ (MAJO, 2005)}, \quad (4)$$

$$S = 111 \cdot \text{Exp}(0.009 P), \quad R^2 = 0.95 \text{ (MDJ, 2004)}, \quad (5)$$

$$S = 247 \cdot \text{Exp}(0.008 P), \quad R^2 = 0.94 \text{ (MDJ, 2005)}, \quad (6)$$

$$S = 153 \cdot \text{Exp}(0.006 P), \quad R^2 = 0.72 \text{ (TUC, 2004)}, \quad (7)$$

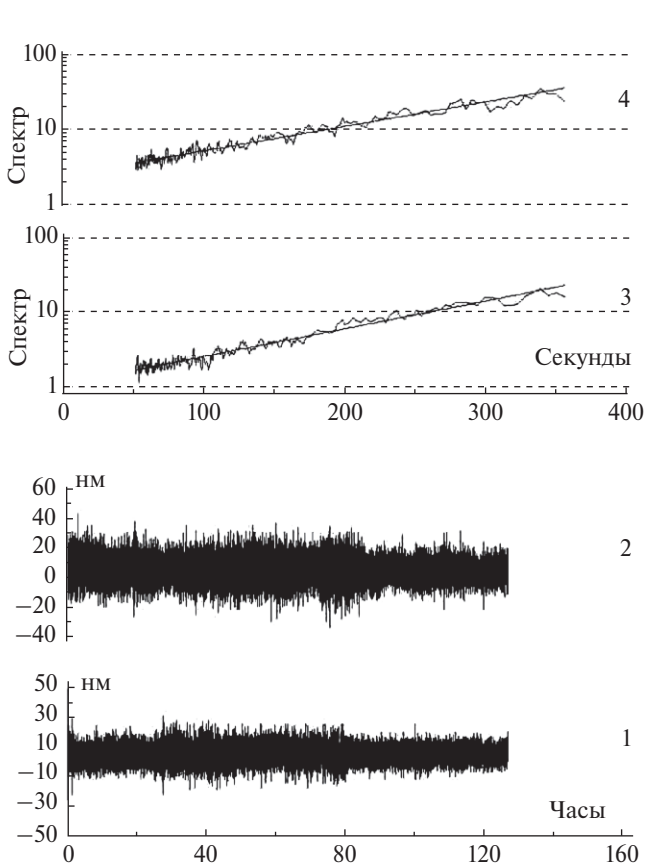
$$S = 130 \cdot \text{Exp}(0.009 P), \quad R^2 = 0.88 \text{ (TUC, 2005)}, \quad (8)$$

$$S = 0.8 \cdot \text{Exp}(0.01 P), \quad R^2 = 0.96 \text{ (СТАО, 2004)}, \quad (9)$$

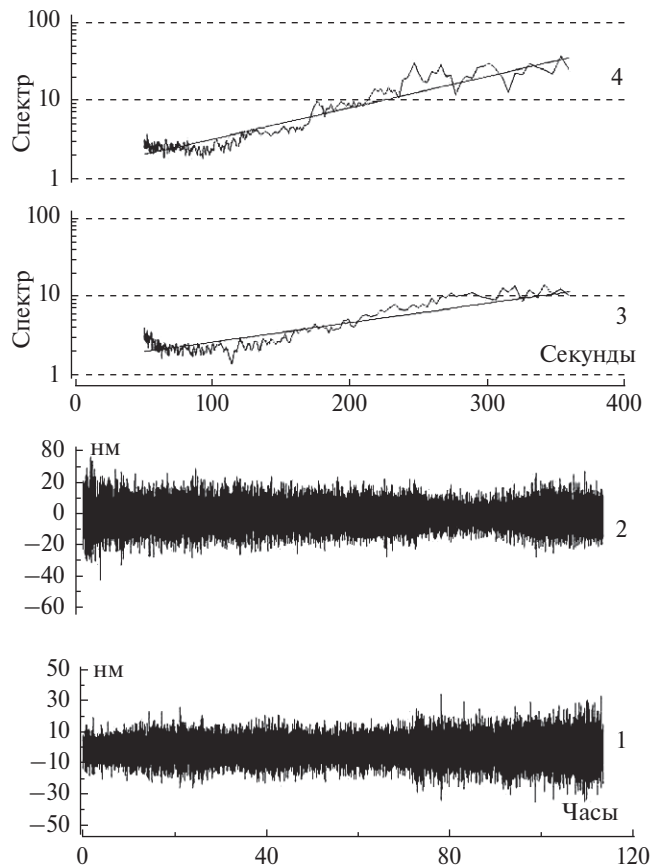
$$S = 1.8 \cdot \text{Exp}(0.009 P), \quad R^2 = 0.93 \text{ (СТАО, 2005)}. \quad (10)$$

Ряды значений на графиках 1 и 2 (рис. 3 – рис. 7) были проверены на нормальное распределение [Кобзарь, 2006]. Мы использовали критерии jbtest и lillietest. Они построены на различных алгоритмах Jarque–Bera и Lilliefors, но оба метода дают возможность со значимостью 5% отвергнуть гипотезу  $H = 1$ , что выборка подчиняется нормальному распределению или отвергнуть гипотезу  $H = 0$ , что выборка отличается от нормального распределения. Оказалось, что вариации большинства значений в графиках 1 и 2 отличались от нормального распределения. Из рис. 3 – рис. 7 следует, что уровень шума в 2005 г. превышает уровень 2004 г. Было выполнено сравнение выборок равной длины 2004 г. (графики 1) и 2005 г. (графики 2) с целью выявления их различий или сходства. Используются непараметрические статистические критерии Смирнова–Колмогорова (СК) и Т–Вилкоксона (ВК). Они не базируются на каком-либо законе распределения, а используют только предположения о случайном характере исходных данных [Кулаичев, 1996]. Эти критерии эффективны также при малых выборках. Оценка





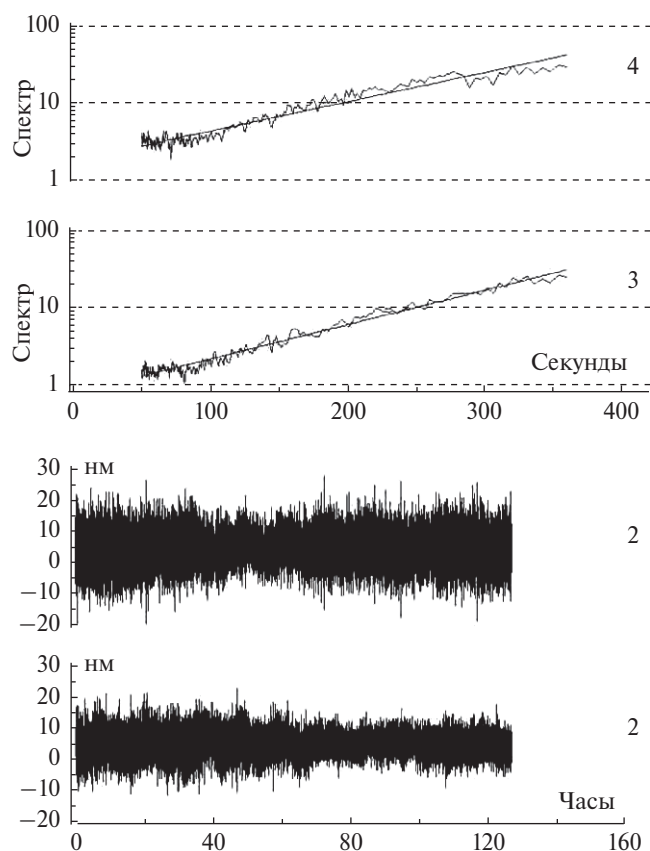
**Рис. 5.** Амплитуда вертикальных перемещений грунта на станции MDJ (Китай) в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. (1) и январе 2005 г. (2). Спектры мощности Фурье этих колебаний (3 и 4).



**Рис. 6.** Амплитуда вертикальных перемещений грунта на станции TUC (США) в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. (1) и январе 2005 г. (2). Спектры мощности Фурье этих колебаний (3 и 4).

сходства или различия выборок определяется уровнем значимости  $\alpha$ . Если  $\alpha > 0.05$ , то принимается гипотеза 0 – нет различия между выборками; при  $\alpha < 0.05$  можно принять гипотезу 1 – выборки различаются. Для станций MAJO MDJ, LVC, СТАО выборки различаются при значениях  $\alpha \ll 0.05$  (гипотеза  $H = 1$ ). Для станции TUC различия не выявлено. Возможно, это связано с неоднородным распределением шума в январе 2004 и 2005 гг. (графики 1 и 2, рис. 7). При сравнении записей других станций (всего 59) было выяснено, что выборки 2004 и 2005 гг. различаются в большинстве случаев. Для всех исследованных станций рост мощности спектра амплитуд смещений с увеличением периода колебаний описывается экспоненциальной зависимостью и проявляется изгиб скорости нарастания спектральной амплитуды в области  $\approx 120$  с. Анализ гистограмм приводит к предположению, что это связано с нарушением симметрии амплитуд колебаний положительной и отрицательной полярности на некоторых временных интервалах.

Проанализируем структуру шума в более детальной развертке во времени. Для этой цели были выбраны две относительно близко расположенные (760 км) станции в Северной Америке: СМВ [38.035 с. ш. – 110.785° з. д.], высота над уровнем моря  $H = 697$  м и СОР [44.586 с. ш. – 123.303° з. д.],  $H = 121$  м. Удалось найти синхронные участки спокойного шума в записях обеих станциях 1 января 2005 г. длительностью 1706 отсчетов по 10 с (4.77 ч). На рис. 8 график 1 представляет значения амплитуд шума станции СМВ в диапазоне 40–360, а графики 2, 3, 4 – результаты его разложения в диапазонах 4–80, 80–160 и 160–320 с. Применялась методика Wavelet Packed Decomposition из программы SpAn <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/967/71967/49364> [Любушин, 2007]. Теория ортогональных разложений цифровых рядов по системе функций по всплескам была изложена в работе [Daubechies, 1988; Daubechies, 1992; Mallat, 1998]. Широко используемым классом ортогональных вейвлет-функций являются функции Добеши  $\psi(t) = D_{2p}$  порядка  $2p$ . Чем выше порядок  $D_{2p}$ , тем

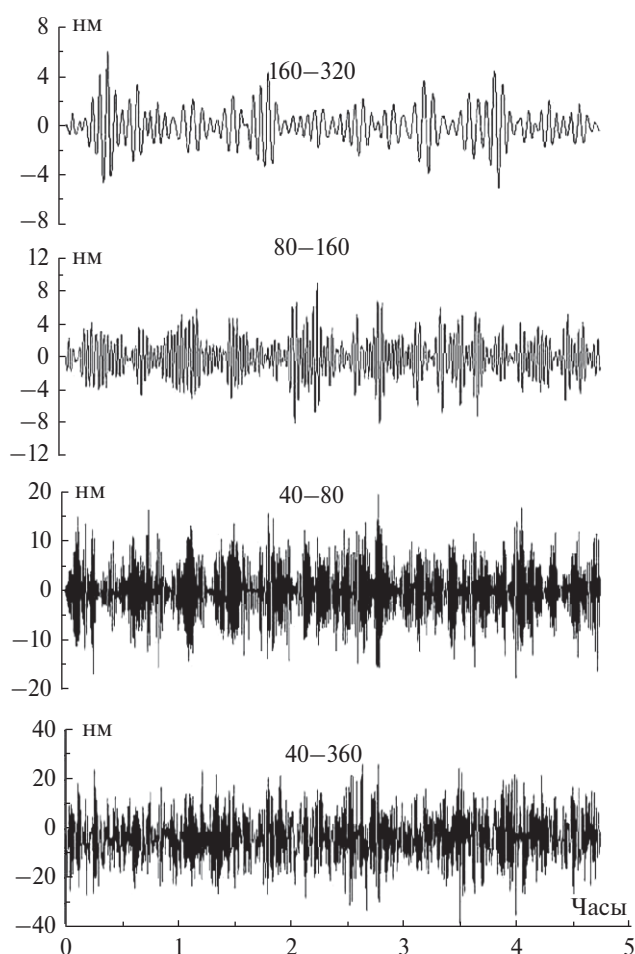


**Рис. 7.** Амплитуда вертикальных перемещений грунта на станции СТАО (Австралия) в интервалах спокойного шума в январе 2004 г. (1) и январе 2005 г. (2). Спектры мощности Фурье этих колебаний (3 и 4).

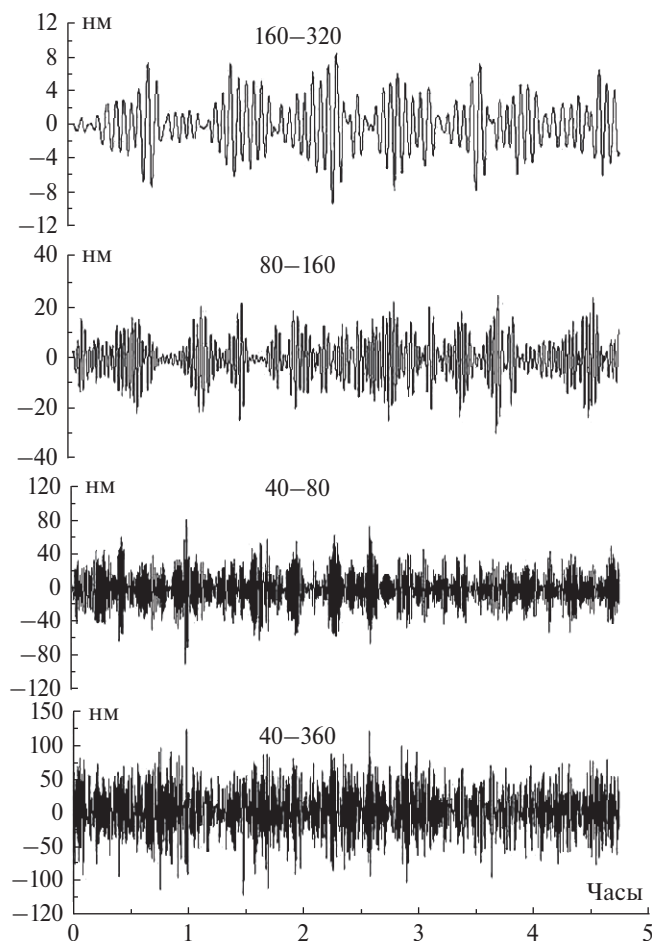
более гладкими они являются и лучше подходят к анализу более гладких возмущений. Результаты на рис. 8 соответствуют вельветам 18 порядка. Отметим следующие характеристики записей. Время появления всплесков шума в разных диапазонах не совпадает. Структура импульсов различается. Форма нарастания и спада импульсов разнообразна. Продолжительность участков повышенного шума изменяется от нескольких минут до получаса. Рис. 9 (станция COR) демонстрирует такие же свойства. Сопоставим теперь записи шума в этих диапазонах на станциях SMB и COR в одни и те же интервалы времени (рис. 10). Время появления всплесков, их форма и длительность на двух соседних станциях различаются во всех диапазонах.

Сопоставим структуру шума с метеорологическими данными. В 10 км от сейсмической станции COR (44.586 с. ш. — 123.303° з. д.) находится метеостанция CORVALLIS USA. Имеются данные о температуре воздуха, атмосферном давлении и скорости ветра с регистрацией

3 раза в час [<https://www.wunderground.com>]. На рис. 11 представлены данные за январь 2004 г. (744 ч). Три нижних графика демонстрируют сейсмический шум в диапазонах 40–80, 80–160, 160–320 с. На трех верхних графиках приведены данные о температуре воздуха  $T$ , атмосферном давлении  $Pa$  и скорости ветра  $W$ . Синхронные короткие импульсы на нижних трех графиках вызваны землетрясениями, и в контексте данной статьи сопоставление времен их появления с сейсмическим шумом не проводится. Нас, в первую очередь, интересуют отмеченные треугольниками участки спокойного шума. Первый из них (90–120 ч) характеризовался пониженной температурой воздуха, высокими значениями атмосферного давления и скорости ветра. Во время второго участка спокойного шума (490–520 ч) атмосферное давление было также высоким, но температура воздуха была пониженной, а ветровая обстановка — спокойной.



**Рис. 8.** Структура сейсмического шума на станции SMB (38.035 с. ш. — 110.785° з. д.) в январе 2005 г. Диапазоны выделенных периодов в секундах указаны над графиками.

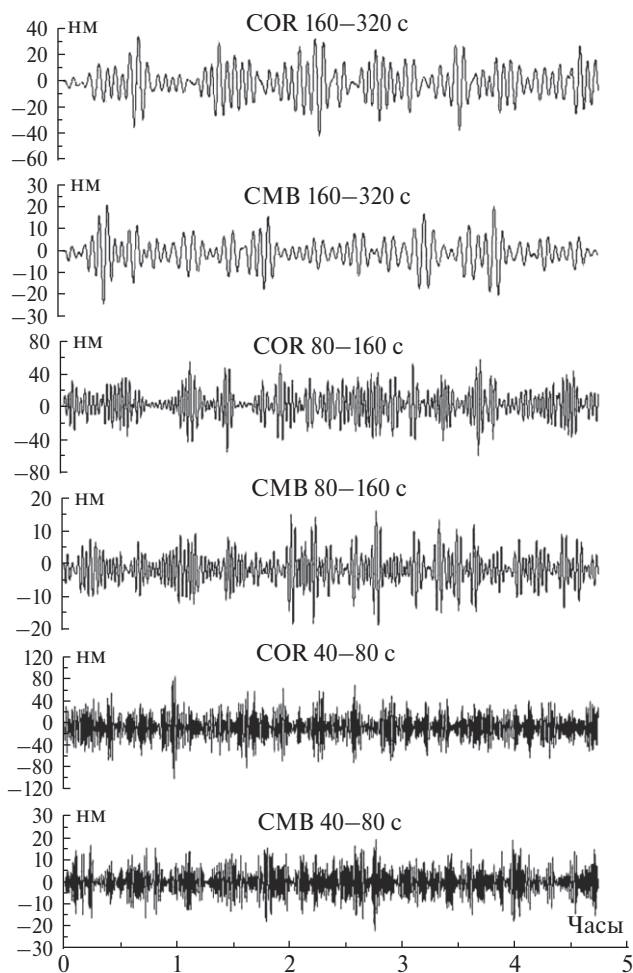


**Рис. 9.** Структура сейсмического шума на станции COR (44.586 с. ш. – 123.303° з. д.) в январе 2005 г. Диапазоны выделенных периодов в секундах указаны над графиками.

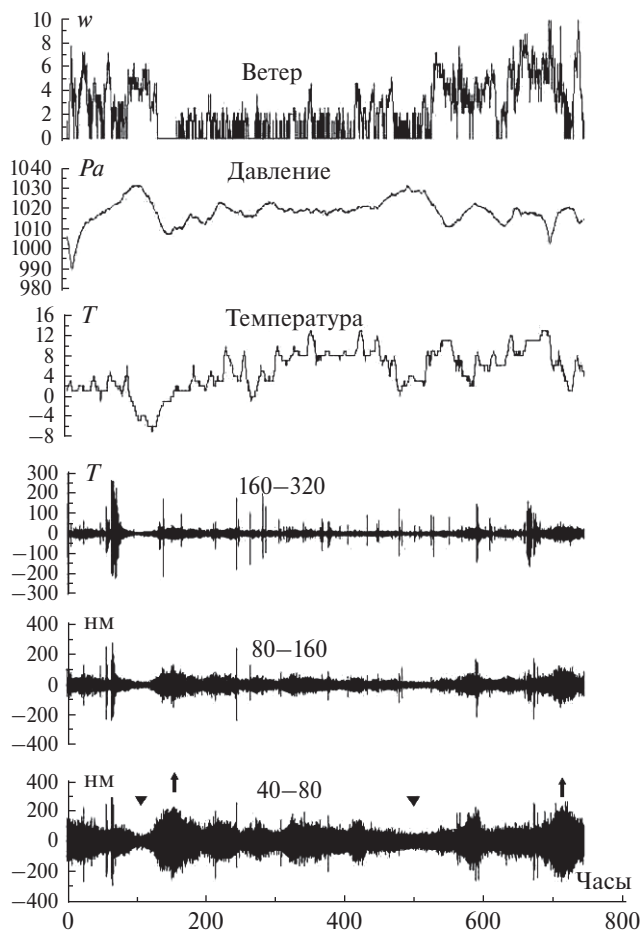
Рассмотрим также два интервала высокого шума, выделенных на нижнем графике стрелками. Первый из них (135–160 ч) характеризовался повышенным градиентом роста температуры и пониженным давлением; значения скорости ветра не определены из-за сбоев в данных. Во время второго участка высокого шума (700–740 ч) все три параметра  $T$ ,  $p$ ,  $w$  демонстрировали повышенные градиенты вариаций их значений. На рис. 12 сопоставление сейсмического шума на станции COR и данных метеостанции CORVALLIS проведено для января 2005 г. Первый из участков спокойного шума (130–150 ч) характеризовался понижением атмосферного давления  $P_a$  и повышенными значениями скорости ветра  $w$ . Второй участок (320–370 ч) наблюдался при высоком атмосферном давлении. Явное усиление шума в интервале 170–190 ч характеризовалось повышением атмосферного давления и большой скоростью ветра. Интервалы спокойного шума наблюдались при высоком

атмосферном давлении. Интервалы высокого шума совпадали с изменением метеорологической обстановки, что довольно естественно.

Аналогичное сопоставление сейсмического шума и метеоусловий в январе 2004 г. выполнено для сейсмостанции TUC (32.309 с. ш. – 110.785° з. д.) и находящейся на расстоянии 15 км метеорологической станции TUCSON (рис. 13). Из рассмотрения рисунка следует, что интервал 100–200 ч спокойного шума не сопровождался заметными изменениями температуры воздуха  $T$ , атмосферного давления  $p$  и скорости ветра  $w$ . При этом увеличение скорости ветра в интервале 220–260 ч не приводит к росту шума. В конце января (720–744 ч) резкое падение атмосферного давления и возрастание скорости ветра также не сопровождается ростом шума. Рис. 14 относится для тех же станций к январю 2005 г. Видно, что продолжительный интервал



**Рис. 10.** Сопоставление структуры сейсмического шума на станциях CMB и COR в одном и том же интервале 1.01.2005 г. Диапазоны выделенных периодов в секундах указаны над графиками.

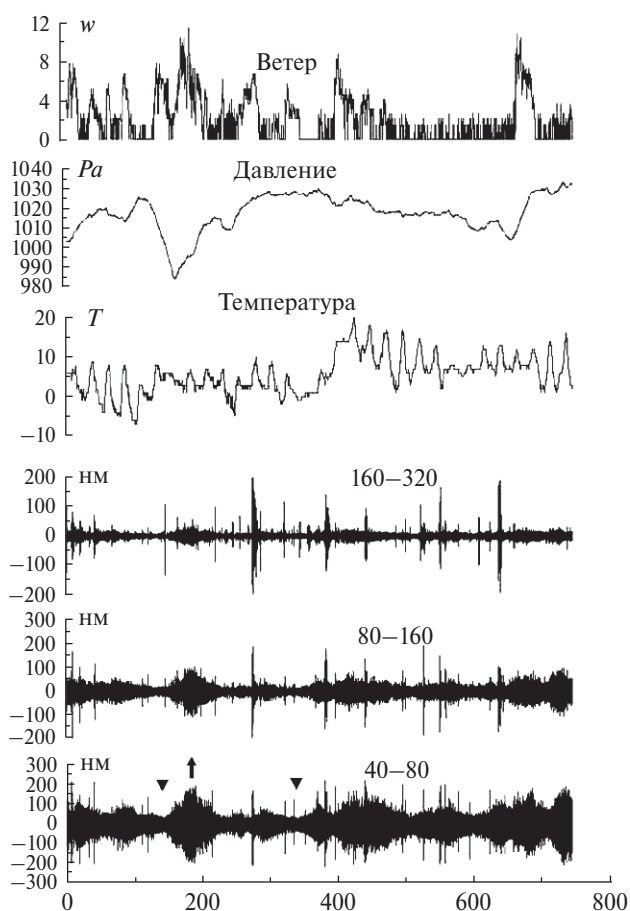


**Рис. 11.** Сопоставление структуры сейсмического шума в январе 2004 г. на станции COR (3 нижних графика) с температурой воздуха ( $T$ , град. С.), атмосферным давлением ( $Pa$ , ГПа), скоростью ветра ( $w$ , м/с) по данным расположенной в 10 км от станции Corvallis (3 верхних графика). Диапазоны шума в секундах указаны над графиками. Треугольниками и стрелками выделены участки спокойного и высокого шума.

спокойного шума 130–270 ч продолжается после 240 ч при падении атмосферного давления (график  $Pa$ ) и увеличении скорости ветра (график  $W$ ). В свою очередь, интервал относительно высокого шума (460–510 ч) не сопровождается заметными изменениями метеорологической обстановки. Надо заметить, что данные метеостанций дают осредненное представление о процессах в атмосфере. Детальное изучение их структуры может привести к лучшей корреляции с сейсмическим шумом. Например, в работе [Адушкин и др., 2017] было показано, что при анализе микропульсаций атмосферного давления удастся выделить приливные волны в атмосфере в широком диапазоне частот. В нашем случае, не совпадение времен возникновения

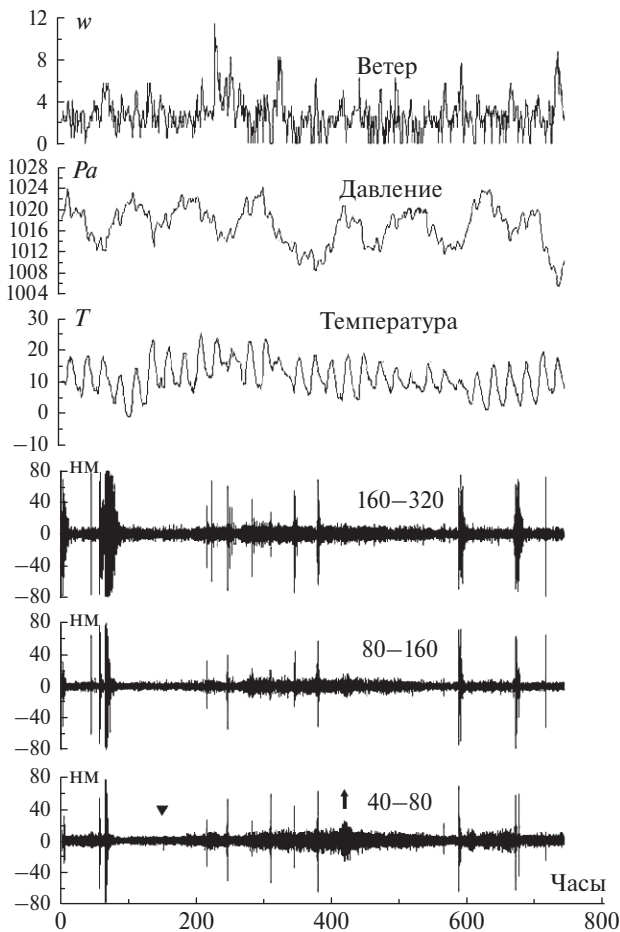
и структуры всплесков шума на разных периодах (рис. 11–рис. 14), по-видимому, говорит о локальности и разнообразии его источников.

Остановимся еще на одном факте, указывающем на связь регистрируемого сейсмическими станциями шума с процессами в атмосфере. При анализе записей высокогорных станций, расположенных, по сути, в тропосфере, были обнаружены эпизоды усиления шума с периодом 24 часа. Примеры синхронных записей 05.01.2004 г. для станций FURI [8.903 с. ш. – 38.688° в. д.], высота  $H = 2545$  м (Африка); LVC [22.613 ю. ш. – 68.911° з. д.],  $H = 2930$  м (Южная Америка) показаны на графиках 1, 2 рис. 15. Максимумы всплесков шума проявляются в 12 ч местного времени, т. е. в полдень. Это не отмечается для станций, расположенных на меньших высотах, например,

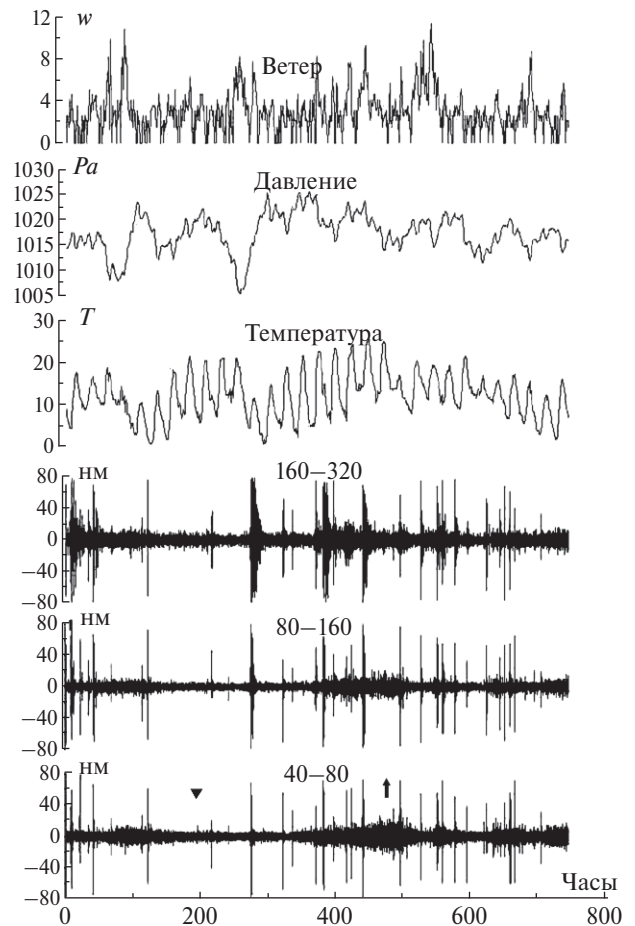


**Рис. 12.** Сопоставление структуры сейсмического шума в январе 2005 г. на станции COR (3 нижних графика) с температурой воздуха ( $T$ , град. С.), атмосферным давлением ( $Pa$ , ГПа), скоростью ветра ( $w$ , м/с) по данным расположенной в 10 км от станции Corvallis (3 верхних графика). Диапазоны шума в секундах указаны над графиками. Треугольниками и стрелкой выделены участки спокойной и высокой шума.





**Рис. 13.** Сопоставление структуры сейсмического шума в январе 2004 г. на станции TUC (3 нижних графика) с температурой воздуха ( $T$ , град. C), атмосферным давлением ( $Pa$ , ГПа), скоростью ветра ( $w$ , м/с) по данным расположенной в 15 км от станции TECSOR (3 верхних графика). Диапазоны шума в секундах указаны над графиками. Треугольником и стрелкой выделены участки спокойного и высоко-го шума.



**Рис. 14.** Сопоставление структуры сейсмического шума в январе 2005 г. на станции TUC (3 нижних графика) с температурой воздуха ( $T$ , град. C), атмосферным давлением ( $Pa$ , ГПа), скоростью ветра ( $w$ , м/с) по данным расположенной в 15 км от станции TECSOR (3 верхних графика). Диапазоны шума в секундах указаны над графиками. Треугольником и стрелкой выделены участки спокойного и высоко-го шума.

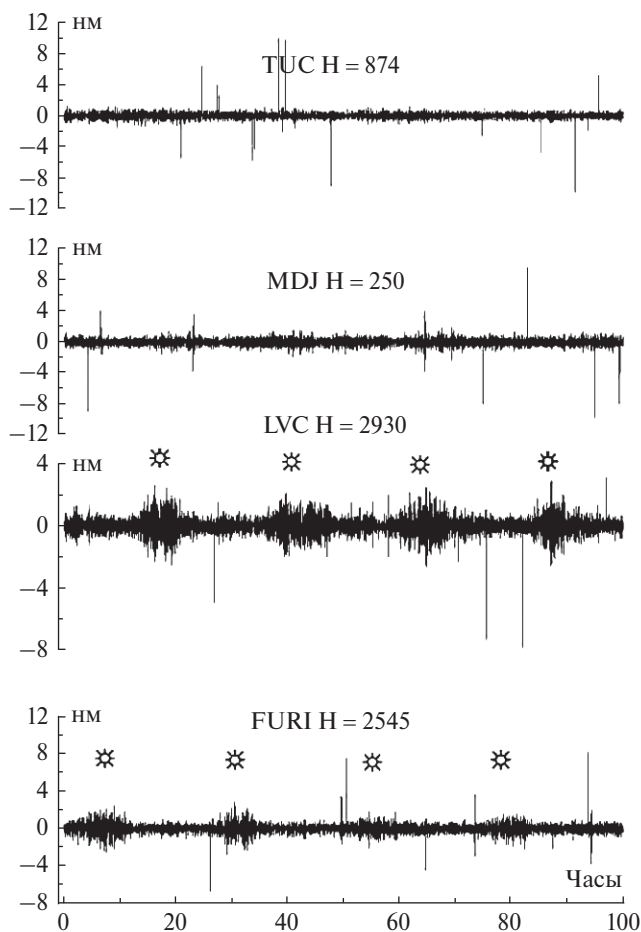
для станции MDJ (44.616 с. ш. – 129.592° в. д.), высота  $H = 250$  м в Китае (график 3) и TUC (32.31 с. ш. – 110.785° з. д.),  $H = 874$  м в Северной Америке (график 4).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Какие процессы влияют на регистрируемый широкополосными станциями «спокойный» сейсмический шум в минутном диапазоне периодов? Интервалы такого шума имеют примерно одинаковую амплитуду скорости перемещения грунта, меньшую по сравнению с их величиной на соседних интервалах. Последние характеризуются постепенным нарастанием и спадом уровня шума и могут включать всплески от землетрясений и техногенных помех.

Отмеченные треугольниками примеры интервалов спокойного шума показаны на рис. 2. Их амплитуда (графики 1, рис. 3–рис. 7) отражает минимальную разрешающую способность сейсмической станции при исследовании сейсмических и деформационных явлений в Земле в диапазоне минут и длиннее.

Спокойный шум в январе 2004 г. на станциях, расположенных в разных регионах планеты, характеризовался амплитудой смещения грунта 20–40 нм (графики 1, рис. 3–рис. 7). В январе 2005 г., после мегаземлетрясения на Суматре 26.12.2004 г.,  $M = 9.1$  он увеличился до 40–60 нм. Его изменение можно видеть из сопоставления графиков 1 и 2 рис. 3–рис. 7. Ранее отмечалось [Соболев, 2014] статистически значимое

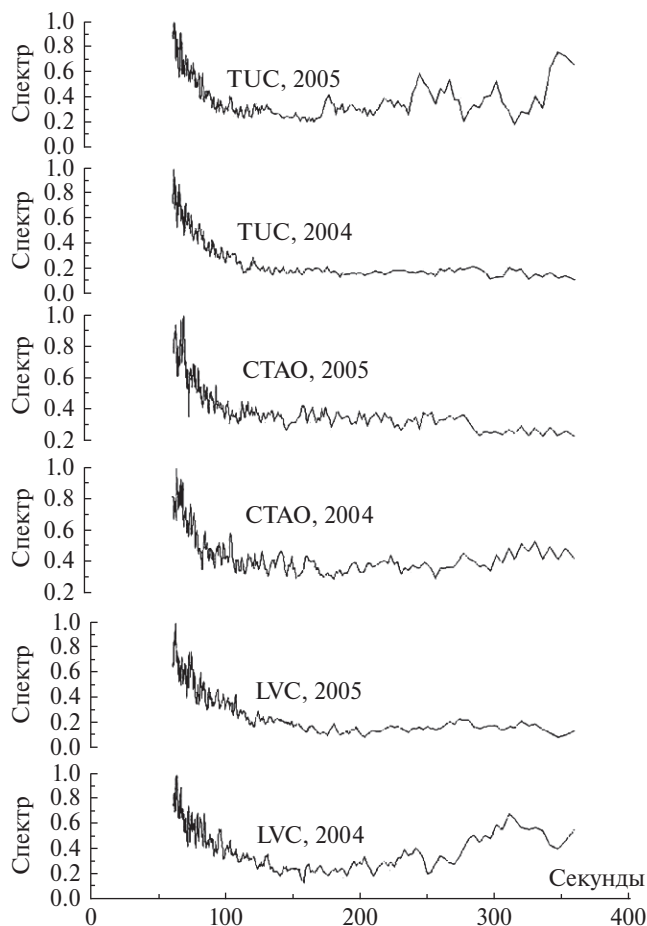


**Рис. 15.** Изменение сейсмического шума высокогорных станций FURI (Африка) и LVC (Южная Америка) в зависимости от времени суток. Название станций и высота их расположения указаны над графиками. Станция MDJ находится в Северо-Восточной Азии, станция TUC – в Северной Америке. Звездочки соответствуют полуденному местному времени (12 ч).

(модифицированный метод Дарлингга) увеличение после этого землетрясения дисперсии сейсмического шума на станциях, удаленных на тысячи километров от эпицентра. Возникновение после больших землетрясений колебаний даже в часовом диапазоне периодов также не является необычным [Соболев и др., 2018]. Но вопрос о влиянии землетрясения Суматра на уровень спокойного шума остается дискуссионным. Не ясно, например, как долго продолжается уровень повышенного шума. Из графиков 2 рис. 3–рис. 7, представляющих суммарную длительность шума в январе 2005 г. следует, что он длится не менее месяца. Для исследования этого вопроса нужно, по-видимому, проанализировать записи ряда станций за многие годы, что выходит за рамки настоящей работы. Здесь же нам важно отметить, что уровень шума

на разных станциях различен, несмотря на то, что станции имеют одинаковые амплитудно-частотные характеристики и при сопоставлении записей учтена чувствительность соответствующей станции. Отсюда вытекает предположение, что на запись шума влияют локальные особенности расположения станции. С другой стороны, интегральное сходство спектров мощности (графики 3 и 4, рис. 3–рис. 7) говорит о влиянии глобального процесса. При изучении детальной структуры спокойного шума в диапазонах 40–80, 80–160, 160–320 с было выяснено, что времена появления всплесков шума, их форма и длительность на разных станциях различаются (рис. 8–рис. 10).

Какой физический процесс отражается в выше отмеченных свойствах шума? В работе [Nishida et al., 2002] обсуждались два механизма возникновения сейсмического шума в минутном диапазоне периодов: 1) распределенные 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 Релея, в том числе на периодах собственных колебаний Земли [Nishida et al., 2002]. Нас интересуют источники спокойного шума отдельной сейсмической станции. Явное различие времен возникновения цугов колебаний на станциях СМВ и СОР (рис. 10) указывает на различное местоположение их источников. Особенно четко это проявляется при больших периодах колебаний 160–320 с (графики 5, 6). Предположим, что колебания представляют собой поверхностные сейсмические волны Релея. 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  $\Delta R = 760$  км. В предположении единого сейсмического источника в твердой Земле следовало бы ожидать высокой степени синхронности колебаний, чего не обнаружено. Таким образом, более правдоподобна гипотеза о том, что источник находится в атмосфере. Заметим, что полученные экспоненциальные закономерности (уравнения 1–10) увеличения амплитуды спектра мощности с ростом периода качественно соответствуют созданной А.Н. Колмогоровым теории локально изотропной турбулентности в атмосфере [Колмогоров, 1941; Монин, Яглом, 1965; Голицын и др., 2014]. Сейсмическая станция в этом предположении регистрирует вертикальные деформации грунта, вызываемые перемещением масс в вихрях



**Рис. 16.** Спектры мощности скорости смещения грунта в 2004 г. (графики 1) и 2005 г. (2) на станциях LVC (Южная Америка), СТАО (Австралия), TUC (Северная Америка). Спектры нормированы на максимальные значения.

разного размера, мощности и пространственного расположения. Нам не удалось обнаружить различий в структуре или спектре сейсмического шума до и после землетрясения Суматра, возрос только уровень шума (рис. 3–рис. 7). Чувствительность практически всех станций не менялась за период с января 2004 г. по январь 2005 г. Если в результате этого мегаземлетрясения появились дополнительные источники шума литосферного происхождения, то влияние было меньше реальных возможностей их обнаружения использованными методами.

Выше указывалось, что на периодах  $< 120$  с спектр мощности перемещений имеет меньший наклон по сравнению с его изменениями в диапазоне более длинных периодов (графики 3–4, рис. 3–рис. 7). Изменения более четко просматриваются на спектрах мощности скорости перемещений. На рис. 16 показаны 6 спектров записей трех станций в январе 2004 и 2005 гг.

До периодов  $\sim 120$  с амплитуда убывает, что естественно для величины скорости колебаний с ростом периода. Однако эта тенденция нарушается при дальнейшем росте периодов. Особенно четко, это проявляется для станции LVC (графики 1, 2). Укажем, что аномальные изменения спектральной плотности сейсмического шума на частоте 8 мГц (125 с) были отмечены в работе [Nishida et al., 2002]. Изучались осредненные данные по 49 сейсмическим станциям с сейсмометрами STS-1. Авторы предложили два механизма: изменения физических процессов в атмосфере или скин-эффект поглощения колебаний в толще океана. На основании наших результатов мы можем, по-видимому, исключить второй механизм. Например, более четкие изменения получены по данным станции LVC (22.613 ю. ш. – 68.911° з. д.), расположенной в горах на высоте 2930 м.

## ВЫВОДЫ

Амплитуда устойчивого сейсмического шума в диапазоне 40–360 с, не осложненного записями землетрясений и эффектами метеорологического происхождения, составляет порядка 20–40 нм, что характеризует реальную разрешающую способность широкополосной сейсмической станции.

Цуги и отдельные импульсы повышенных по амплитуде колебаний шума различаются в диапазонах 40–80, 80–160 и 160–320 с по форме и времени возникновения, как на конкретной станции, так и на соседних станциях, что свидетельствует о различных и локальных источниках их происхождения.

Шум отражает турбулентные процессы в атмосфере Земли и его экспоненциальный рост с увеличением периода колебаний соответствует теории локально изотропной турбулентности в атмосфере А.Н. Колмогорова.

Амплитуда шума после мегаземлетрясения Суматра 26.12.2004 г. с  $M = 9.1$  возросла в январе 2005 г. в 1.5–2 раза вне зависимости от расположения сейсмической станции. Не удалось обнаружить других различий в структуре или спектре колебаний до и после землетрясения. Предполагается в связи с этим, что после данного мегаземлетрясения произошла активизация атмосферных процессов, которая длилась не менее месяца.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-05-00026.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре // *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 77–85.
- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Эффекты лунно-солнечного прилива в земной коре и атмосфере Земли // *Физика Земли*. 2017. № 4. С. 76–92.
- Голицын Г.С., И.И. Мохов, С.Н. Куличков и др. Редакционная коллегия. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. М.: ГЕОС. 2014. С. 696.
- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2006. С. 816.
- Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Докл. АН СССР*. 1941. Т. 30. № 4. С. 299–303.
- Кулаичев А.П. Методы и средства анализа данных в среде Windows. Stadia 6.0. М.: НПО Информатика и компьютеры. 1996. 256 с.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука. 2007. С. 228.
- Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1–2. М.: Наука. 1965. 1967.
- Соболев Г.А. Сейсмический шум. М.: ООО «Наука и образование». 2014. 272 с.
- Соболев Г. А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н. Временная и пространственная структура длиннопериодных колебаний после землетрясений // *Физика Земли*. 2018. № 3. С. 1–15.
- Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets // *Comm.pure appl.math*. 1988. V. 41. P.909–996.
- Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. № 61 in CBMS-NSF Series in Applied Mathematics. SIAM. Philadelphia. 1992. (Русский перевод: Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 464 с.).
- Ekstrom G. Time domain analysis of Earth's long-period background seismic radiation // *J. Geophys.Res.* 2001. V. 106. № B11. P. 26483–26493.
- Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic Press. San Diego, London, Boston, N.Y., Sydney, Tokyo, Toronto. 1998. 577 p. (Русский перевод: Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир. 2005. 671 с.)
- Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz // *Geoph. Res. Letters*. 2002. V. 29. № 10. P. 52–1–52.4.
- 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.
- Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1982. V. 72. P. 2349–2367.

## Spatial and Temporal Structure of Global Low-Frequency Seismic Noise

G. A. Sobolev<sup>a,\*</sup> and N. A. Zakrzhevskaya<sup>a</sup><sup>a</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

\*E-mail: sobolev@ifz.ru

Received August 27, 2018

The paper aims to study in detail the structure of seismic noise before and after the Sumatra mega-earthquake with  $M = 9.1$  of December 26, 2004. The records by the IRIS seismic stations in 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 of each station, intervals free of earthquakes, interference from manmade impacts, and noise enhancement due to cyclone propagation were selected. The amplitude of steady seismic noise in the range from 40 to 360 s, not complicated by the recordings of earthquakes and effects of meteorological origin, is in the order of 20 to 40 nm, which characterizes the actual resolution of a broadband seismic station. 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 increased by a factor of 1.5–2 in January 2005 compared to January 2004, irrespective of the location of the seismic station.

**Keywords:** earthquake, oscillations, pulsations, seismic noise, atmosphere, seismic stations