

А. С. Жолондз, В. В. Карпинский

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ 30–50 СЕКУНД

Введение

Если до последнего времени изучение сейсмического шума производилось с целью выяснения его источников и соответственно возможностей его подавления, то в последние годы сейсмический шум в ряде исследований используется как полезный сигнал (в том числе и для изучения строения Земли с помощью поверхностно-волновой томографии). В связи с этим вновь пробудился интерес к исследованию источников сейсмического шума, причем в разных частотных диапазонах, поскольку в поверхностно-волновой томографии необходимо использовать сейсмические записи и получаемые по ним дисперсионные кривые поверхностных волн в возможно более широком интервале периодов.

Сейсмический шум регистрируется в широком диапазоне частот — от высокочастотных сигналов (десятки герц) до очень низкочастотных (тысячные доли герц). Источником высокочастотных колебаний (единицы и десятки герц) часто является антропогенная деятельность. Главными источниками сигналов в полосе частот 0.2–1 Гц можно считать воздействие ветра и морских волн. Согласно исследованиям Штеффена и др. [1], в диапазоне частот 0.01–10 мГц основным источником сейсмического шума является изменение атмосферного давления. Их эксперимент показал, что даже на глубине 170 м влияние атмосферного давления весьма значительное. Сорреллс и др. [2] обнаружили, что атмосферные вариации могут быть причиной сейсмического шума в полосе периодов 20–100 с с различными механизмами воздействия на вертикальную и горизонтальные компоненты. Локальные изменения атмосферного давления производят статическую нагрузку на поверхность Земли, которая генерирует колебания Земли. Подобные колебания Земли являются основными источниками шума на вертикальной компоненте. Их горизонтальные амплитуды очень малы, но все равно они генерируют и горизонтальные наклоны, являющиеся «помехами» на горизонтальных каналах. Этот эффект может быть устранен путем заглубления регистрирующих датчиков. Мюллер и Цурн [3] установили, что сейсмический шум на более длинных периодах может быть обусловлен изменениями силы тяжести. Они обнаружили небольшие, но скачкообразные изменения гравитационной силы, связанные с локальными изменениями давления в процессе прохождения холодных фронтов. Также авторы показали, что этот длиннопериодный шум можно уменьшить введя деконволюцию сейсмических данных с данными давления.

1. Особенности сейсмического шума на станции Пулково

Станция Пулково (PUL) была основана в 1906 г. князем Б. Б. Голицыным и стала Центральной сейсмологической станцией России. На ней были установлены первые сейсмометры маятникового типа с магнитоэлектрическим преобразователем. С самого начала наблюдений на станции были отмечены интенсивные шумовые помехи в диапазоне периодов 10–60 с, причем с повышенной интенсивностью на горизонтальном канале западно-восточного направления (E). Поскольку такие помехи были особенно сильны в осенне-зимние периоды, высказывались предположения [4], что они являются следствием вызванных ветром колебаний холма, на котором расположена станция. Статистическая связь между характером ветра (умеренный, слабый ветер, штиль) и интенсивностью колебаний была показана в работе [5], но прямая связь между силой ветра и интенсивностью сейсмического шума на таких периодах не прослеживалась.

В спектре низкочастотного сейсмического шума на станции Пулково присутствуют максимумы на частотах 0.2 Гц (микросейсмы Атлантического океана) и 0,025 Гц. Природа последнего максимума остается пока не до конца понятна, он отчетливо проявляется на E-компоненте, существенно слабее на горизонтальной компоненте север–юг (N) и практически отсутствует на вертикальной (Z) компоненте (рис. 1). При этом видно, что значения амплитуд на горизонтальном E-канале на порядок превосходят значения амплитуд на горизонтальном N-канале.

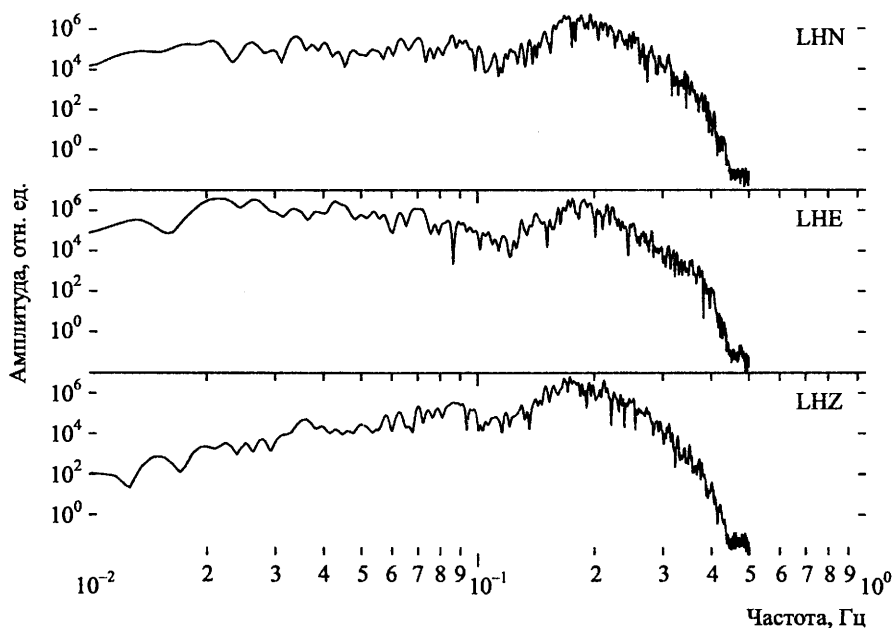


Рис. 1. Амплитудный спектр по каналам Z, N, E соответственно для станции Пулково

Задача данного исследования заключалась в анализе характеристик шума на станции Пулково с целью выяснения его природы.

2. Соотношения амплитуд вертикальной и горизонтальных составляющих

Анализ записей шума ряда станций по всему миру, расположенных не только на побережье, аналогично станции Пулково, но и внутри континентов и на островах, показал, что отношение интенсивностей вертикальной и горизонтальной составляющих сейсмического шума в диапазоне периодов 10–60 с лежит в пределах 0.1–0.5. Для станции Пулково и расположенной достаточно близко эстонской станции сети «Геофон» (1996–1999 гг.: Тарту (TRTE), а с 2003 г. по настоящее время: Васула (VSU)) этот параметр примерно на порядок ниже. Отношение интенсивностей горизонтальных компонент лежит в более широких пределах, но и здесь станция Пулково значительно выделяется.

Приведем средние отношения амплитуд по каналам за 2000 г.:

Станция	A_Z/A_H	A_E/A_N
ALE	0.41	0.81
OBN	0.30	0.55
PUL	0.05	10.72
TRTE (VSU)	0.02	2.18
LVZ	0.26	1.95
ARU	0.16	1.24
KEV	0.11	3.11

3. Построение графиков движения частиц

Хотя на станциях, кроме PUL, не выявляется существенного преимущества колебаний на одном горизонтальном канале по отношению к другому, могла существовать вероятность того, что преимущественное направление горизонтальных колебаний в шуме на этих станциях происходит в каком-то азимуте, отличном от EW или NS. Для выяснения этого вопроса были построены графики горизонтального движения частиц почвы для станций PUL, OBN и ARU. На рис. 2–4 горизонтальная ось — это смещения частицы вдоль направления восток–запад, а вертикальная — вдоль направления север–юг.

На графиках движения частицы, построенных для станции Пулково, характерная картина иллюстрируется на рис. 2. В диапазоне периодов 2.5–10 с сейсмический шум формируется, в основном, микросейсмами Атлантического океана. В диапазоне больших периодов (20–60 с) движение частиц преимущественно происходит вдоль направления восток–запад.

Рис. 3 иллюстрирует пример графика движения частицы на станции Арти. Для данной станции нельзя выделить какой-нибудь постоянно характерной картины. Графики движения частиц могут не иметь выделенных направлений, однако достаточно часто встречаются «диагональные» графики, вытянутые вдоль различных направлений. Таким образом, можно сделать вывод, что картина сейсмического шума на станции неустойчивая и зависит от условий, выявить которые на данном этапе не представляется возможным.

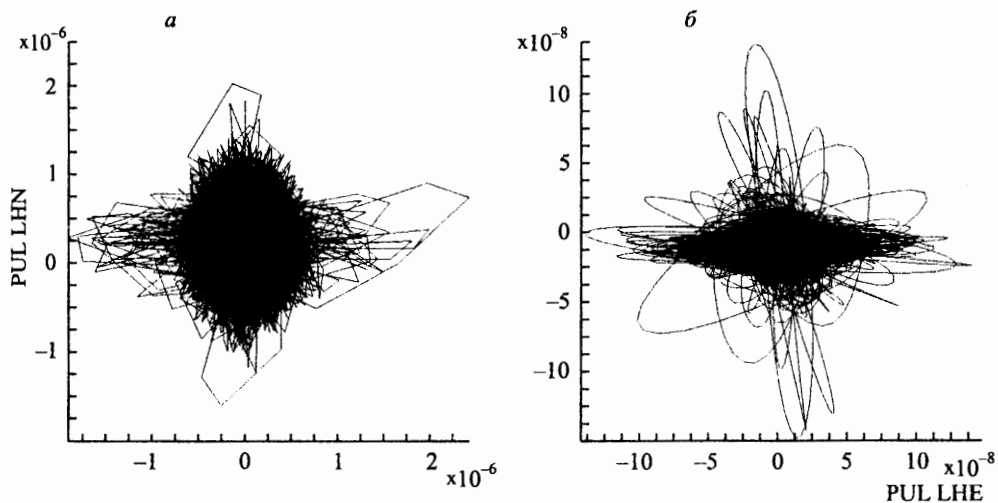


Рис. 2. График движения частицы на станции Пулковско:
 а — фильтр 2.5–10 с; б — фильтр 20–60 с

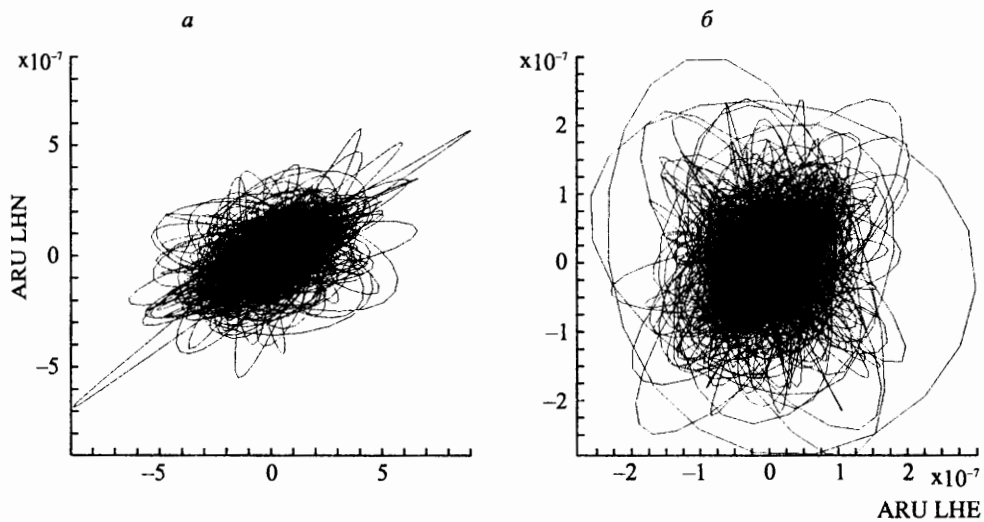


Рис. 3. График движения частицы на станции Арты, фильтр 20–60 с:
 а — 28.06.2000; б — 06.07.2000

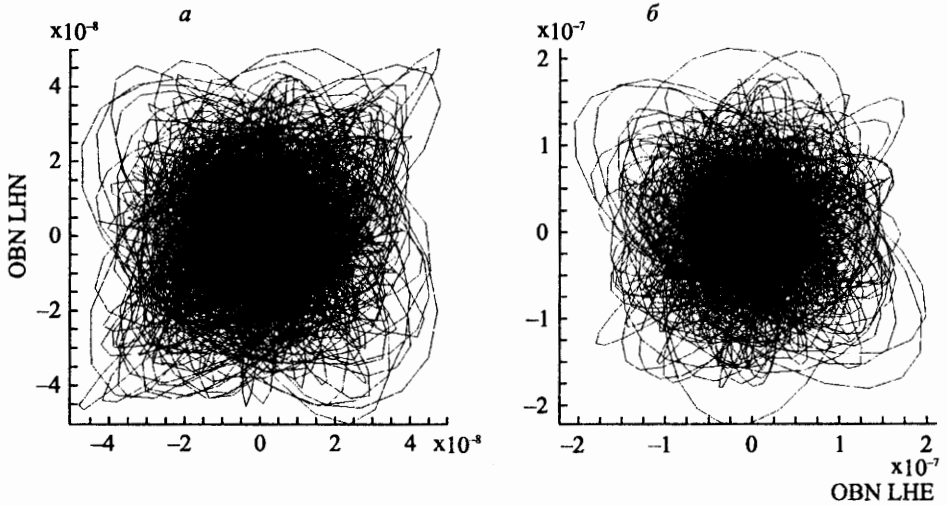


Рис. 4. График движения частицы на станции Обнинск:
a — фильтр 2.5–10 с; *б* — фильтр 20–60 с

И, наконец, на третьей станции (в Обнинске) наблюдается устойчивая картина, где частица в процессе движения образует симметричные графики на всех периодах (рис. 4).

4. Исследование вклада поверхностных волн в шумовую компоненту

В последние годы за рубежом в области поверхностно-волновой томографии для изучения строения коры и верхней мантии стало широко развиваться направление, основанное на использовании записей сейсмического шума. Такой подход основан на предположении, что шум в длиннопериодном диапазоне образован поверхностными волнами, приходящими на станцию с разных направлений, т.е. он возбуждается источниками, случайно распределенными по земной поверхности. В этом случае кросс-корреляционная функция шума на паре станций оказывается совпадающей с функцией Грина поверхностной волны, т.е. представляет собой сигнал в поверхностной волне, возбужденной источником, совпадающим по местоположению с одной из станций и зарегистрированный на другой станции. При этом оказывается, что вклад в функцию Грина дают только источники, расположенные на одной линии со станциями вне отрезка между станциями (рис. 5). В случае, когда источники распределены по поверхности равномерно, кросс-корреляционная функция оказывается симметричной (рис. 5, *a*). Если же распределение интенсивности источников неравномерное, то кросс-корреляционная функция оказывается несимметричной (рис. 5, *б*).

Поскольку кросс-корреляционная функция шума представляет собой функцию Грина на поверхностной волне, то по ней определяют дисперсионные кривые поверхностных волн и используют эту информацию в поверхностно-волновой томографии [6,7].

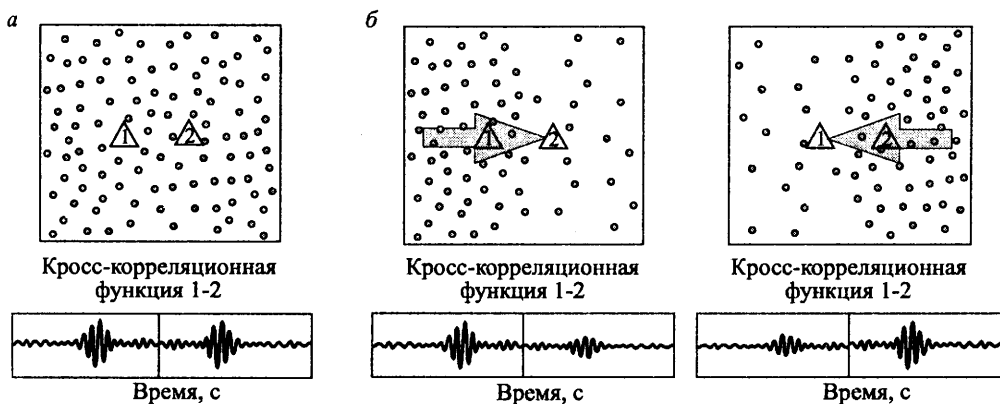


Рис. 5. Кросс-корреляционная функция сейсмического шума:

а — источники шума расположены в пространстве равномерно; б — интенсивность источников больше за одной из станций

В зависимости от того, какие компоненты записи используются для построения корреляционной функции, можно получать функции Грина рэлеевской волны (компоненты Z-Z) или волны Лява (компоненты T-T). В то же время по асимметрии корреляционной функции можно судить о распределении источников по поверхности [8]. Исследования показывают, что различие в интенсивности источников по разные стороны профиля между станциями может быть разным в зависимости от частоты [9].

Анализ корреляционных функций позволяет судить о вкладе волн Рэля и Лява в записи сейсмического шума. Поскольку на станции Пулково в шуме наиболее интенсивной является горизонтальная компонента E-W, то предполагая, что шум образован главным образом поверхностными волнами, можно заключить, что в Пулково он образован волнами Лява, источники которых располагаются к северу или к югу от станции. Такие большие амплитуды не могут быть следствием волн Рэля, приходящих в направлении с запада или с востока, так как в этом случае были бы велики амплитуды и на вертикальной компоненте.

Но если шум на станции Пулково обусловлен интенсивной волной Лява, приходящей с севера или с юга, то можно ожидать, что корреляционная функция компонент T-T между записями Пулково и станций, расположенных к северу или к югу от Пулково, будет резко асимметричной на периодах 30–50 с. Такие корреляционные функции были вычислены между записями компонент T-T станций Пулково и Ловозеро (на севере) и Пулково — Обнинск (на юге) (рис. 6). В интересующем нас диапазоне периодов 30–50 с существенной асимметрии корреляционных функций не наблюдается. Из этого следует, что, хотя в сейсмическом шуме и присутствуют поверхностные волны, их вклад в общую картину шума крайне мал. По-видимому, большую часть шума образуют локальные источники, которые при усреднении корреляционных функций за большой интервал времени гасятся. Что может быть таким «локальным источником» для станции Пулково? Одним из возможных объяснений может быть то, что интенсивные горизонтальные колебания в азимуте E-W обусловлены наклонами поверхности

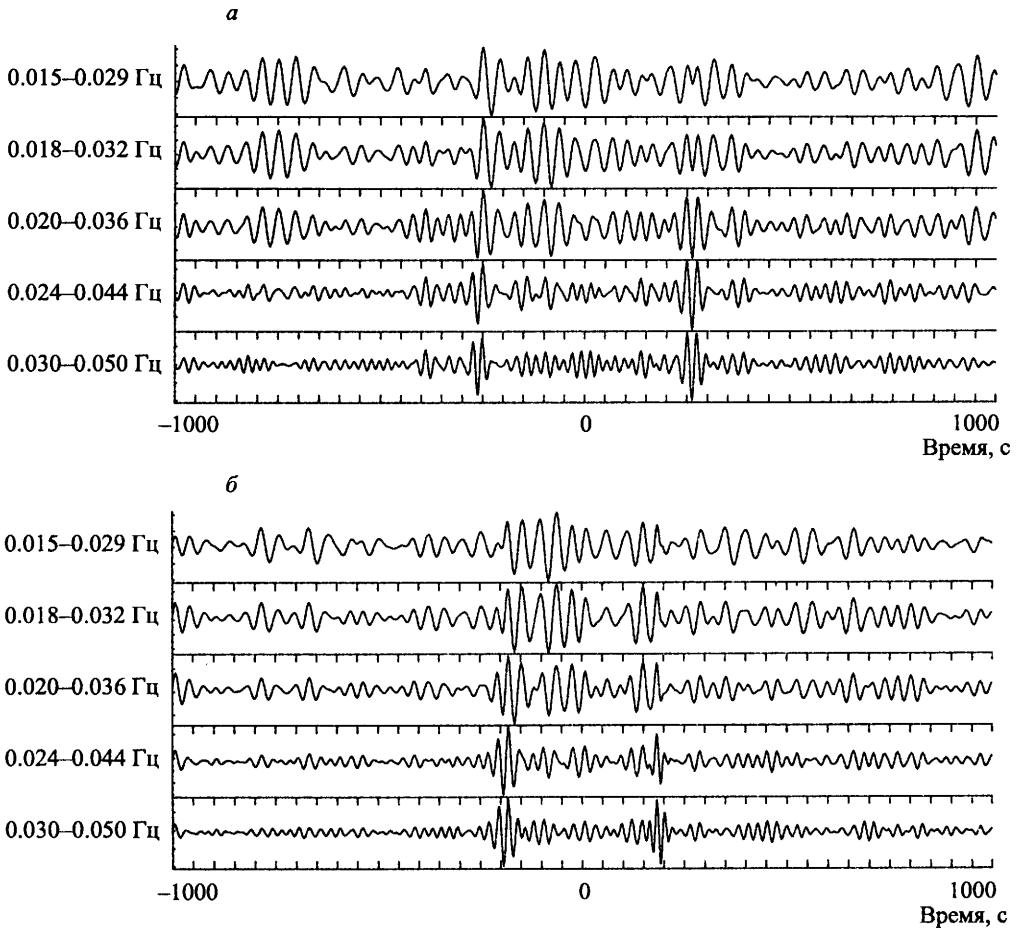


Рис. 6. Кросс-корреляционная функции трансверсальной компоненты сейсмического шума, рассчитанная в различных диапазонах частот, для пары станций Пулковое – Ловозеро (а) и Пулковое – Обнинск (б)

в этом направлении. Наклоны же могут быть следствием градиентов атмосферного давления, что в осенне-зимние периоды довольно реально.

Заключение

В результате проведенных исследований удалось достоверно зарегистрировать превышение значений амплитуд на горизонтальном Е-канале над значениями амплитуд на горизонтальном N-канале. Кросс-корреляционный анализ и анализ шумовых характеристик на других станциях позволяет предположить, что такое превышение амплитуд на одном из горизонтальных каналов может быть вызвано локальной особенностью геологического строения в районе станции. Механизм воздействия с земной поверхностью может происходить через локальные наклоны.

Указатель литературы

1. *Steffen H. et al.* Numerical modeling of barometric pressure induced seismic noise at the Black Forest Observatory (BFO), Germany // *Geophysical Research Abstracts*. 2004. Т. 6.
2. *Sorrels, G. G., McDonald J. A., Der Z. A., Herrin E.* Earth motion caused by local atmospheric pressure changes. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1971. V. 26. P. 83–98.
3. *Müller T., Zürn V.* Observation of gravity changes during the passage of cold Fronts // *J. Geophys.* 1983. V. 53. P. 155–160.
4. *Феофилактов В. Д.* Помехи в длиннопериодной сейсмометрии. М.: Наука, 1977.
5. *Санников К. Ю., Лыскова Е. Л.* Вариации длиннопериодного шума на сейсмической станции PUL (Пулково) в полосе частот от 0.5 до 0.008 Гц в 1999–2003 гг. // *Вопросы геофизики*. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2005. Вып. 38. С. 56–62.
6. *Bensen G. D., Ritzwoller M. H., Barmin P., Levshin A. L., Lin F. C., Moschetti M. P., Shapiro N. M., Yang Y.* Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.*, 2007. V. 169. P. 1239–1260.
7. *Shapiro N. M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M. H.* High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise // *Science*, 2005. V. 307. P. 1615–1618.
8. *Lin F. C., Ritzwoller M. H., Townend J., Savage M., Bannister S.* Ambient noise Rayleigh wave tomography of New Zealand // *Geophys. J. Int.*, 2007. V. 170. P. 649–666.
9. *Королева Т. Ю., Яновская Т. Б., Патрушева С. С.* Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // *Физика Земли*. 2009. № 5. С. 3–14.